

## 2017 年度中国古生物学十大进展评选结果

根据中国古生物学会第十一届五次常务理事会和第十一届四次理事会会议决议以及《中国古生物学年度十大进展评选细则》，中国古生物学会于 2018 年 1 月开展十大进展的推荐提名工作，收到理事推荐的 2017 年中国古生物学十大进展提名成果共计 20 项。1 月底，由中国古生物学会第十一届理事会成员和荣誉理事(含院士)组成评审委员会进行投票评选。评审委员会由杨群理事长担任主任，副理事长孙革、童金南、邓涛和姚建新担任副主任。

经过评委会投票评选，并经评委会主任和副主任审定，学会功能型党委审核，2017 年度中国古生物学十大进展评选结果如下：

排名	第一完成人姓名	进展名称	第一完成单位	成果发表刊物
1	汪筱林	发现翼龙伊甸园，揭秘翼龙生命史——大量 3D 翼龙蛋和胚胎首次发现	中国科学院古脊椎动物与古人类研究所/ 中国科学院大学	Science
2	戎嘉余	中国显生宙腕足动物属志	中国科学院南京地质古生物研究所	科学出版社 (英文专著)
3	孟庆金	侏罗纪滑翔哺乳形类动物的新发现	北京自然博物馆	Nature
4	韩健	华南寒武系底部有口无肛的微型后口动物	西北大学	Nature
5	李占扬	中国许昌发现晚更新世古老型人类头骨	中国科学院古脊椎动物与古人类研究所/河南省文物考古研究院	Science
6	谢树成	地质微生物记录海洋和陆地的极端环境事件	中国地质大学(武汉)	Earth and Planetary Science Letters
7	王敏	1.3 亿年前早期鸟类化石揭示尾骨与尾羽独立演化	中国科学院古脊椎动物与古人类研究所	Nature Communications
8	徐洪河	解密最古老树木的生长模式	中国科学院南京地质古生物研究所	PNAS
9	蔡晨阳	缅甸琥珀中隐翅虫化石揭示白垩纪蘑菇多样性及最早的社会性寄生	中国科学院南京地质古生物研究所	Nature Communications, Current Biology
10	冯卓	晚二叠世木材蛀孔展示了一个复杂的生态关系网络	云南大学深时陆地生态研究所	Nature Communications

## 2017 年度中国古生物学十大进展成果简介

### 进展一 发现翼龙伊甸园,揭秘翼龙生命史——大量 3D 翼龙蛋和胚胎首次发现

主要完成者:汪筱林,中国科学院古脊椎动物与古人类研究所/中国科学院大学

其他完成者:Kellner A W A、蒋顺兴、程心、王强、马迎霞、亚合甫江·排都拉、Rodrigues T、陈鹤、Sayao J M、李宁、张嘉良、Bantim R A M、孟溪、张鑫俊、裘锐、周忠和

**科学意义** 由中国科学院古脊椎动物与古人类研究所研究员、中国科学院大学教授汪筱林领导的研发团队,于 2017 年 12 月 1 日在《Science》发表了有关哈密翼龙动物群的最新研究成果。报道了一件超过 200 枚 3D 翼龙蛋、胚胎和骨骼三位一体保存的重要化石标本,其中有 16 枚三维立体的胚胎化石,这是世界上首次发现 3D 翼龙胚胎,为突发性的湖泊风暴事件导致翼龙集群死亡并快速埋藏才得以保存的珍贵标本。该研究揭示了哈密翼龙具有相对早熟的胚胎发育模式,其后肢发育速度较前肢快,孵化之后只能走不能飞;牙齿尚未萌出,还不能主动觅食,需要父母照料;从胚胎到亚成年都具有快速生长的骨组织类型。在《Science》同期配发的评述中,英国学者认为该研究是“认识翼龙繁殖的关键进展”,同时本研究所涉及的翼龙种类也被认为是“所有翼龙中被了解最为透彻的一个类型”。

**进展简介** 翼龙是地球上第一类飞向天空也是唯一绝灭的飞行脊椎动物,因其飞行的需要演化出纤细中空的骨骼,所以在世界范围内翼龙化石都十分稀少,而翼龙蛋和胚胎化石更是罕见。除了汪筱林团队发现和研究的 5 枚三维立体保存的哈密翼龙蛋之外,迄今为止一共报道了 6 枚翼龙蛋化石,在 3 枚含有翼龙胚胎的标本中,2 枚来自中国的热河生物群,1 枚来自阿根廷;另外的 3 枚翼龙蛋都没有保存胚胎,其中 2 枚与一悟空翼龙类的产蛋母体同时保存,产自中国的燕辽生物群,这些翼龙蛋都是以二维压扁形式保存的,仅阿根廷发现了一枚三维保存的翼龙蛋。尽管目前有关翼龙蛋和胚胎化石的研究取得了一定的进展,但由于化石发现很少,而且大部分是二维压扁保存的,很多生物学问题如胚胎发育和生殖策略等很难了解清楚。

中国科学院古脊椎动物与古人类研究所研究员、中国科学院大学教授汪筱林领导的新疆哈密科考队,自 2006 年以来,经过十余年哈密戈壁连续的野外科考、抢救性采集和保护,发现了距今约 1.2 亿年的早白垩世哈密翼龙动物群,这一地区也已成为世界上最大和最富集的翼龙化石产地,不但首次发现三维立体保存的雌雄翼龙个体,同时发现大量 3D 保存的翼龙蛋和胚胎与之共生,被认为是翼龙研究两百多年来最重要和激动人心的发现之一。近年来,他们在新疆哈密戈壁早白垩世地层中,发现并抢救性采集了一件超过 200 枚翼龙蛋、胚胎和骨骼化石三位一体保存的重要标本,其中 16 枚翼龙蛋含有三维立体的胚胎化石,这是世界上首次发现的 3D 翼龙胚胎(插图 1,2)。2017 年 12 月 1 日美国《Science》发表了中国与巴西两国科学家组成的国际合作团队对哈密翼龙蛋与胚胎研究的重要成果,这是继 2014 年在哈密戈壁发现大量幼年到成年雌雄哈密翼龙和世界上首枚三维立体保存的翼龙蛋之后的又一次重要发现,显示翼龙群居的生活习性,揭示了翼龙生命史。

通过 CT 扫描重建和显微修理,发现在处于发育晚期的胚胎中后肢骨骼已经发育完全,说明其孵化后具有地面行走能力,但是前肢附着飞行肌肉的部位还没有完全发育,说明其还不具有飞行能力,首次证明翼龙后肢发育速度较前肢快,孵化出壳后婴儿只会走不会飞。在仅有的一件保存有头部骨骼的发育晚期的胚胎中,精细修理和 CT 扫描均没有发现牙齿,说明哈密翼龙牙齿萌发较晚,孵化后可能还不能自己主动捕食,需要父母的照顾。哈密翼龙虽然是属于早熟型的胚胎发育模式,但是并不是之前认为的翼龙出生后就能主动觅食和飞行。



骨组织学研究显示,翼龙具有较快的骨骼生长发育速度。翼龙长骨骨壁薄,内部多中空,体现在骨组织上就是长骨骨髓腔的扩张速度很快,骨骼中心的骨松质和接近中心位置的骨密质无法保存,都被快速扩张的骨髓腔所占据。所以,要想通过骨组织学来了解翼龙的个体发育等生理信息,就需要从幼年到成年个体一系列完整的标本来进行研究。选取哈密翼龙的两枚胚胎和数件幼年到接近成年个体的长骨进行研究,这也是世界上首次对翼龙胚胎进行组织学切片和显微结构研究。显示翼龙胚胎主要由编织骨组成,几件幼年到亚成年的大小不同的上肢骨骼则主要以纤层骨为主,这些都是快速生长的骨组织类型,说明翼龙具有较快的生长发育速度,首次揭示了翼龙从胚胎开始的生长发育史。

化石特异埋藏特征显示,大型湖泊风暴事件导致翼龙集群死亡并短距离搬运快速埋藏。如此丰富的翼龙蛋与骨骼化石的特异埋藏,在全世界也是绝无仅有的,那么是什么原因造成的呢?通过沉积学和埋藏学观察,发现哈密翼龙蛋和骨骼化石主要产自于一套含有横向不稳定的富含红色泥岩砾屑的灰白色湖相砂岩中,这些泥质砾屑不是盆地外源搬运来的,而是来自盆地内源物质。化石富集层厚度都不大,所有化石毫无例外的富集在具泥质砾屑的高能风暴沉积中,而且骨骼化石虽然分散保存,但每一块纤细中空的骨骼几乎都是完整的,包括细长的牙齿和薄薄的头饰都与头骨或下颌关联且保存完好。因此,认为这些数量巨大的翼龙和翼龙蛋很可能经历了多次湖泊风暴事件,这种高能的风暴经过翼龙生活的湖岸边和巢穴,将翼龙蛋及群居生活的大小不同、不同性别的翼龙卷入其中,尸体被撕裂,经过短时间漂浮聚集和快速搬运,成千上万分散的翼龙个体和蛋一起快速埋藏在风暴沉积中。

英国林肯大学丹尼斯·迪明教授在同期《Science》杂志以“翼龙如何繁殖”为题发表了评论文章,认为该工作是“认识翼龙繁殖的关键进展”,英国朴茨茅斯大学古生物学家马克·威顿认为,这一工作有望使哈密翼龙成为“所有翼龙中被了解最为透彻的一个类型”。《Science》和《Nature》等都进行了长篇报道,国内外各大媒体也进行了广泛和深度报道,其中新华社华盛顿分社还以“中国成为翼龙研究中心”为题进行了述评。

论文信息 Wang Xiao-lin, Kellner A W A, Jiang Shun-xing, Cheng Xin, Wang Qiang, Ma Ying-xia, Paidoula Yahefujiang, Rodrigues T, Chen He, Sayão J M, Li Ning, Zhang Jia-liang, Bantim R A M, Meng Xi, Zhang Xin-jun, Qiu Rui, Zhou Zhong-he, 2017. Egg accumulation with 3D embryos provides insight into the life history of a pterosaur, *Science*, **358**(6367): 197—201. DOI: 10.1126/science.aan2329.

## 进展二 《中国显生宙腕足动物属志》

主要完成者:戎嘉余(主编),中国科学院南京地质古生物研究所

其他完成者:金玉珩、沈树忠、詹仁斌(以上副主编)、孙东立、侯鸿飞、李国祥、乔丽、马学平、黄冰、张志飞等 23 位学者

科学意义 本志书对中国显生宙古生代(寒武纪、奥陶纪、志留纪、泥盆纪、石炭纪和二叠纪)和中生代(三叠纪、侏罗纪和白垩纪)9个纪的海相地层中,于1883年至2015年间根据中国材料创建的757个属的腕足动物化石进行逐一查考和再研究,对属的取舍及其分类位置提出新观点;在最新各纪年代地层的框架下,更新各属的地层历程和地理分布;在梳理其他腕足动物属的基础上,论述各时期的化石组合或动物群;这些化石不仅在地层划分对比、盆地分析和矿产勘探上有重要意义,也在古生态、古生物地理、古气候与古环境及全球古地理再造上有独到的学术价值(插图3)。本志书是对中国腕足动物的一次全面而系统的总结,为国内外同行进行全球总结和腕足动物宏演化历程的深化研究,提供了不可多得的可靠基础资料。

进展简介 腕足动物(Brachiopoda)是一类营底栖固着生活方式的海洋无脊椎动物,自寒武纪早期起源以来,在漫长的5亿多年演化历程中,经历了多次繁盛与衰落的大变化。在古生代海域深约200m以内的陆表海、斜坡或盆地平坦海底上,腕足动物经常是个体最丰富、多样性最高、分布最广的优势类群之一;在经受了奥陶纪末和泥盆纪晚期两次大灭绝后,又遭受了二叠纪末史前最惨烈的一次大灾变;到中生代,其在海洋生态系统中的优势已不复存在;从新生代起,腕足动物的丰度和多样性锐减,分布范围强烈的碎片化和边缘化,与古生代的总体繁盛相比,判若两类。在今日的海洋里,腕足类已然零星分布,成为无脊椎动物中的稀有代表。腕足动物属的地质历程一般较短,在海相地层中易于发现和采集,使其生物地层意义甚为突出;腕足动物群频繁演替的兴衰史,称得上是地球生物宏演化过程的一个缩影;各时期、不同板块孕育着相似或不同的腕足动物群和特征的土著属种,故在全球古地理再造上,腕足动物也有着不可替代的重要作用。

Era	Period	Epoch	Distinctive or specialized Palaeozoic brachiopod genera of China: examples	
Palaeozoic	Permian	Lopingian	<i>Titanothyris</i> Jin and Hu, 1982; Guadalupian, S. China	
		Guadalupian	<i>Permiella</i> He, 1983; Lopingian, S. China	
		Cisuralian	<i>Pararigbyella</i> Shen and Zhang, 2008; Lopingian, S. China	
	Carboniferous	Mississippian	Late	<i>Gondolina</i> Jin and Liao, 1966; Serpukhovian, S. China
			Early	<i>Kansuella</i> Chao, 1928; Viséan, S. China
		Tournaisian	Late	<i>Finospirifer</i> Yin, 1981; Tournaisian, S. China
			Middle	<i>Galeatethyris</i> Jin, 1983; Viséan-Serpukhovian, S. China
			Early	<i>Kueichowella</i> Yang, 1978; Serpukhovian, S. China
	Devonian	Late	<i>Erectocephalus</i> Xian, 1978; Givetian, S. China	
		Middle	<i>Athyrisina</i> Hayasaka 1920; upper Pragian to Eifelian, S. China	
		Early	<i>Dicelostrophia</i> Wang, 1956; Emsian, S. China	
	Silurian	Llandovery	<i>Spinochonetes</i> Rong et al., 1974; Llandovery, S. China	
			<i>Quangyuania</i> Sheng, 1975; Telychian, S. China	
			<i>Sinostricklandia</i> Rong et al., 2005; Aeronian, S. China	
	Ordovician	Late	<i>Yangtzeella</i> Kolarova, 1925; Floian-Darriwilian, S. China	
Middle		<i>Lepidorthis</i> Wang, 1956; Dapingian, S. China		
Early		<i>Saucrothis</i> Xu et al., 1974; Darriwilian, S. China		
Cambrian	Terreneuvian	<i>Deloprosopus</i> Jin et al., 2006; late Katian, S. China		
		<i>Rongambonites</i> Zhan and Cocks, 1998; Katian, S. China		
		<i>Costitrimarella</i> Rong and Li, 1993; Katian, S. China		

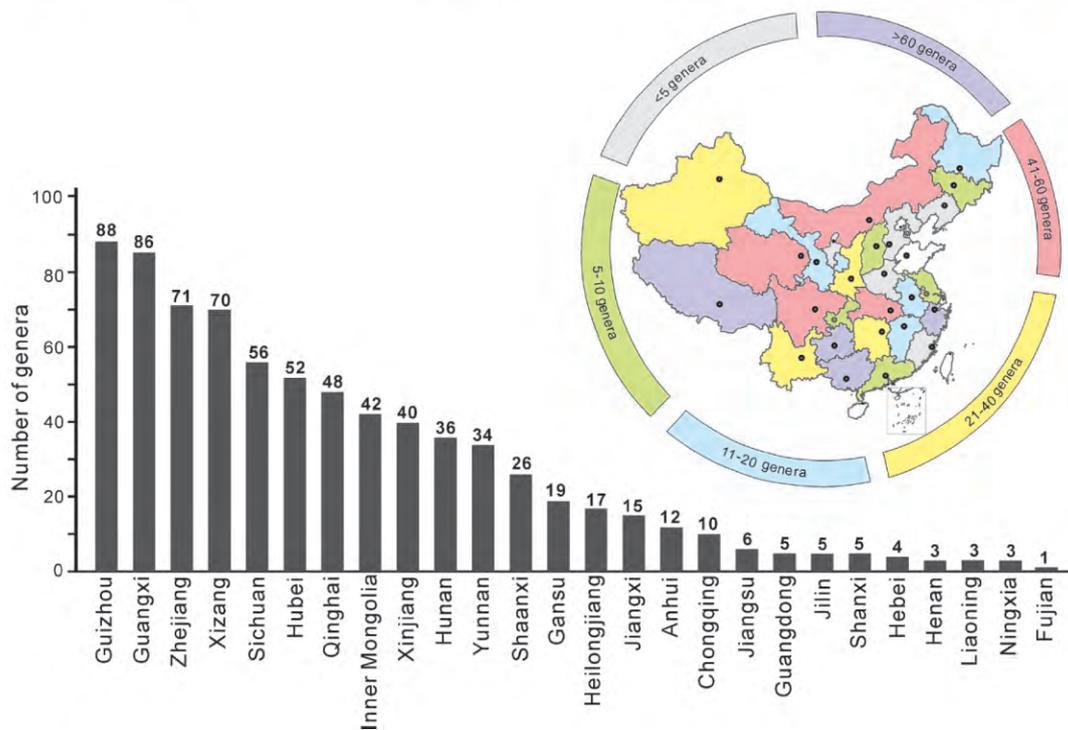


插图 3 中国显生宙各纪有代表性的腕足动物(上图)及中国各省(自治区、直辖市)新建腕足动物属的数目

中国是腕足动物化石赋存的大国,研究历史可追溯至 19 世纪中叶。近百年来,中国学者或在中国工作的外籍专家完成了本领域早期里程碑式的成果,相关工作对科研、教学和生产实践均起到了重要作用。为确定含腕足动物化石的地层时代及其对比、揭示各期动物群的性质,研究者发表了大批论文,创建了很多新属,这一点尤其体现在 20 世纪七、八十年代出版的各省区古生物图册中。以中国化石为标准建立的大量腕足动物属,散见于百余种出版物或未刊资料里,查寻这些相关资料实非易事,特别是在地区性很强的专著、图册及

专业或非专业会议论文集中发表的新属,外国学者寻找起来更为困难。因此,出版一本全英文的综述中国腕足动物属的志书,既符合中、外学者的共同愿望,又方便学者交流使用,不仅充分体现其科学意义和实用价值,也实现了我国五代专家学者的夙愿。

这条摸清家底的思路是由金玉环院士于 1986 年提出的;经过 8 年的分工写作,部分文稿于 1995 年初步完成。但因为种种主、客观原因,本项工作随即被搁置下来,中断了 10 余年。2008 年,戎嘉余院士领衔,开始聚焦本志书的编写,有更多中青年学者参与进来。经过近 10 年的努力,书稿全部完成。前后算来,本志书撰写历时长约 18 年。在中国科学院、国家科技部和国家自然科学基金委支持和资助下,相关研究所和高校以及科学出版社的通力合作下,终于在 2017 年底在北京正式出版。

本属志采用了国际上广泛认同的新的腕足动物分类系统,对中国的属及其所含物种进行查考和系统古生物学再研究,涉及到属的分类、异名录、词源、模式种、特征、比较或讨论、种的归属、地质历程和地理分布等;涵盖从 1883 年至 2015 年间、根据中国材料创建的 757 个属(归于 15 个目、近 200 个科);全部化石来自显生宙古生代和中生代共 9 个纪的海相地层中,跨越地质历史约 4.5 亿年。

本着“一个都不能少”的原则,本志书将所有依据中国材料建立的 757 个属级分类单元,全部收录进来,逐个给予编号、按规范记录并展示其模式种的图影。本志书确立有效属 468 个,占总数的 61.8%;提出次同义名的属 180 个,占总数的 23.8%。对这些分类单元进行系统厘定和分类取舍,提出最新的观点。在最新年代地层框架基础上,确定各个属的地层历程和地理分布。

全书共配有插图 446 幅。除产地分布、地质历程外,绝大多数均展示模式标本或其他标本的外部形态或内部构造。各纪独立成章,插图均单独编号、自成系统。总共附有图版 125 帧,分别置于每一章的最后,以方便读者。全书共展示 604 个中国腕足动物属模式种的正模(holotype),另附部分物种的副模(paratype)、地模(topotype)和非模式种的标本。

本志书还探讨了各纪、各时期腕足动物的生物地理特征及其在世界古地理上的位置;论述了中国腕足动物的宏演化特征,包括寒武纪生物大爆发、奥陶纪生物大幅射、奥陶纪末生物大灭绝、泥盆纪弗拉期-法门期之交的生物大灭绝、二叠纪末生物大灭绝和中三叠世生物辐射过程中的基本特征与宏演化意义;根据中国腕足动物某些大类群最早出现的化石记录,提出中国(尤其华南)是一批超科和科的主要发源地;就中国古生代不同地质时期、已知超大个体(壳长或壳宽超过 100 mm)腕足动物的发育记录,揭示它们的时空分布与古气候、古环境之间的关系,但个中问题甚多,值得今后深入研究。在梳理其他腕足动物属的基础上,各纪还就已掌握的实际资料,阐述各时期腕足动物的组合或动物群、生态和生物地理特征。

综合上述,在地层划分对比、盆地分析、古生态、古生物地理、古气候与环境推测以及矿产勘探上,腕足动物都有着重要的学术价值。《中国显生宙腕足动物属志》的出版将充分体现这样的意义和价值。

成果信息 Rong Jia-yu (Editor-in-chief), Jin Yu-gan, Shen Shu-zhong, Zhan Ren-bin (Associate Editors), Chen Xiu-qin, Hou Hong-fei, Fu Li-pu, Huang Bing, Li Guo-xiang, Li Rong-yu, Liu Di-yong, Ma Xue-ping, Qiao Li, Shi Xiao-ying, Su Yang-zheng, Sun Dong-li, Sun Yuan-lin, Weldon E A, Xian Si-yuan, Xu Gui-rong, Xu Han-kui, Zhang Yan, Zhang Zhi-fei, Zong Pu. 2017. Phanerozoic Brachiopod Genera of China. Beijing: Science Press. 1—1124.

### 进展三 侏罗纪滑翔哺乳形类动物的新发现

主要完成者:孟庆金,北京自然博物馆

其他完成者:罗哲西(通讯作者)、季强

科学意义 由北京自然博物馆孟庆金研究员所率领的研究团队于 2017 年 8 月 17 日的《Nature》杂志上报道了侏罗纪会滑翔的哺乳形类动物的重要发现。新发现的滑翔动物属于哺乳形类动物基干支系,是现代哺乳动物的祖先类群,也是所有哺乳动物漫长演化历程中已知系统位置最为原始的、具有皮翼的滑翔动物。新发现表明,滑翔功能和运动行为,在远古哺乳动物祖先类型就曾经演化出现,并在恐龙时代的生态系统中,就已经分异并适应多元生态环境了,甚至发展出其他脊椎动物无法进入到的新的生境,这也进一步支持和扩展了哺乳动物在最早期就曾出现多样演化的新观点,也为中生代脊椎动物生态系统的结构多样化提供了新证据。

**进展简介** 哺乳动物是当今世界上最重要也是相当繁荣多样的动物类群之一,其中大多数是陆栖动物。在空中飞行或滑翔的运动方式,有利于它们利用地栖动物不能企及的新的食物资源,是哺乳动物最为特异的演化适应特征之一。空中飞翔这一演化优势,在自然选择之下,在新生代哺乳动物中多次出现,比如,人们熟知的动力飞行动物蝙蝠、能够滑翔的分布于中国的特有物种复齿鼯鼠以及分布在北美等地的啮齿类飞鼠等。而在中生代,早期哺乳动物也与现代哺乳动物一样出现过向空中演化的尝试。

哺乳动物在晚三叠世开始出现,漫长的演化历史中很大一部分都在恐龙称霸的中生代。但哺乳动物在中生代的演化历史,尤其是侏罗纪哺乳动物的演化历史,仍然有许多未解之谜。近年来,在中国东北部发现的重要的中生代哺乳动物化石,具有形态各异、生态多样的特点,展现了早期哺乳动物的新面貌。如柱齿兽类,发展出了树栖、半水栖和地下穴居生活等多种多样的生活模式,呈现出不同的生活习性。这些新发现改变了传统的观点,表明早期哺乳动物在恐龙主宰的生态系统中就已经分异并已经适应多元生态环境。

新发现的哺乳形类动物产自我国辽宁省建昌县距今约 1.6 亿年的晚侏罗世地层中,为哺乳动物演化树的早期分化绝灭支系——贼兽类的新属种,命名为似叉骨祖翼兽(*Maiopatagium furculiferum*) (插图 4, 5)。似叉骨祖翼兽化石标本精美地保存了皮膜和毛发的结构,这些皮翼连接在颈部、前后肢和尾椎之间,形成前皮翼(膜)、侧皮翼(膜)和尾皮翼(膜),与现生哺乳动物的滑翔皮翼(膜)相似。祖翼兽的另一个显著骨骼特征是其锁骨与间锁骨已经愈合,形成坚固的“Y”形结构,不仅与飞行鸟类叉骨的形状相似趋同,而且还保留了哺乳形类动物和单孔类相似的肩带形状,以一种哺乳动物特有的原始的肩带,实现了肩部和前肢之间的机动性,显现出灵活的运动特点,因此获得滑翔能力。祖翼兽的前肢活动主要发生在肩锁关节(锁骨—肩峰突关节)和肱骨关节处,不同于有袋类和胎盘类动物在滑翔时的肩部活动发生在锁骨与胸骨转动关节处。祖翼兽的其它前肢骨关节、四肢骨骼的比例具有许多与滑翔功能相关的形态特征,充分表明这些新哺乳形类动物是滑翔动物。

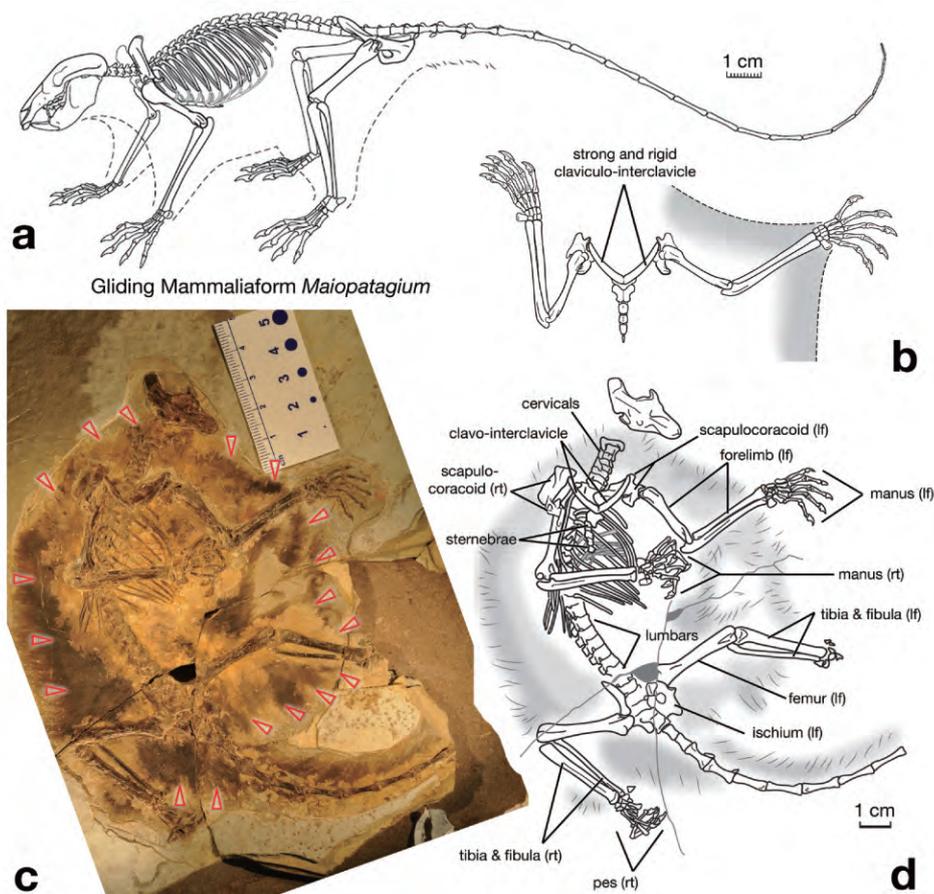


插图 4 似叉骨祖翼兽(*Maiopatagium furculiferum*)正型标本(c)和骨骼重建图(a,b,d)

现生有胎盘和有袋类动物中的滑翔动物,其滑翔运动模式与肢体骨骼的比例具有很好的相关性。通过对现代哺乳动物运动模式和形态学的多变量分析,推断祖翼兽是已经具有飞行能力的树栖属种,是从树栖生活的贼兽祖先类群演变而来的;其它某些贼兽属种是适于树栖生活的类群,但不太可能具有飞行能力。这些推论对哺乳动物演化的理解具有更广泛的意义。



插图 5 似叉骨祖翼兽(*Maioptagium furculiferum*)复原图(赵闯绘)

滑翔行动方式与植物食性相组合,是现代滑翔哺乳动物生活方式的一个重要特点。现代滑翔哺乳动物的食性基本是植食性的,主要食用被子植物的嫩叶、种子、果实和其它像花一样的软组织等。祖翼兽与多种现生的飞翔动物的牙齿形态趋同相似,表明其食性生态也很相似,其食性以植食性为主,兼有杂食性。祖翼兽生活在与现代完全不同的植物群落中,由于有花被子植物在侏罗纪时尚未占据植物群的主导地位,因此这些贼兽类应以晚侏罗世已知的蕨类植物以及苏铁类、银杏类、松柏类等裸子植物为主要食物,主要取食植物较软的部分,如新鲜的嫩叶、嫩枝分生组织、球果以及可能的种子蕨类植物的生殖结构。研究表明植食性与滑翔运动组合的生活方式,最早演化已经出现在原始哺乳动物与侏罗纪植物生态系统中,一亿年之后,又在现代哺乳动物与被子植物中重新演化出现,这是趋同生态演化的新例证。从现生的有袋类和有胎盘类的树栖类祖先和其它中生代哺乳动物开始,滑翔飞行便在这些动物中经历了多次且不断重复的漫长的演化历史。

新发现的祖翼兽,具有适合滑行的皮肤膜和骨骼特征,其指节特征提供了其具有与皮翼目和蝙蝠相似的栖息行为证据,并且它们的脚部像蝙蝠一样具有一个用于支持翼膜的跟骨距。这种具有在空中滑翔能力的原始哺乳形类动物是一类与树栖动物不同的新物种,它们一起展示了一种进化“实验”,类似于在有袋类和有胎盘类的树栖动物中进行的滑翔飞行的迭代进化一样。不管怎样,新发现的标本提供了最原始的涉及到飞行的演化模式,表明这一类具有飞行能力的哺乳动物,起源于树栖类的祖先,最终飞向天空。这些空中飞行或滑翔的动物都跨越了由地面栖息向空中运动的重要演化过渡,占据了新的生态位。这些新的发现正不断

改写着哺乳动物久远的进化历史,也彻底改变着人们对中生代哺乳动物的认识和理解。

论文信息 Meng Qing-jin, Grossnickle D M, Liu Di, Zhang Yu-guang, Neangder A I, Ji Qiang, Luo Zhe-xi, 2017. New gliding mammaliaforms from the Jurassic. *Nature*, **548**(7667): 291—296. DOI: 10.1038/nature23476.

#### 进展四 华南寒武系底部有口无肛的微型后口动物

主要完成者:韩健,西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室/陕西省早期生命与环境重点实验室

其他完成者:舒德干(通讯作者)、Conway Morris S、欧强、黄海

科学意义 西北大学舒德干团队的韩健研究员等人于 2017 年 2 月 9 日在《Nature》杂志上发表封面论文,报道了发现于我国陕南寒武系底部宽川铺组(距今 5.35 亿年前)毫米级球囊型动物化石——冠状皱囊虫。皱囊虫代表着已知最古老、最原始的后口动物,或代表基础动物与后口动物之间的珍稀过渡类群;填补了原始后口动物的化石实证与分子进化钟预测的起源时间之间的鸿沟;揭示了两侧对称动物体型在寒武纪逐渐增大的演化规律;对在前寒武纪地层中探寻其它动物门类的始祖具有重要启示。

进展简介 后口动物包括人类所属的脊椎动物、棘皮动物、半索动物、尾索动物、头索动物以及一些绝灭化石类群(如古虫动物门)。分子进化钟预测后口动物共祖起源于 6.7 亿年前。过去 20 年间,西北大学舒德干团队在我国云南澄江生物群中发现了包括天下第一鱼在内的类型众多的最古老的多门类后口动物,但其化石记录皆集中在 5.2 亿年前,且个体达到厘米级水平。应该在何处、什么时代地层才能找到更古老的始祖化石?这些始祖化石究竟是何面目?是否跟 5.2 亿年前的后口动物存在演化的连续性?这些问题依然成谜。西北大学舒德干团队的韩健研究员等人、中国地质大学(北京)欧强教授与英国剑桥大学 S. Conway Morris 教授等合作,发现了来自中国陕南寒武系底部宽川铺组最早期的距今 5.35 亿年前的毫米级微型动物化石——冠状皱囊虫(*Saccorhytus coronarius*)。这种两侧对称动物尚未发育肛门,其袋状身体上有一个可伸缩的位于腹面的大口和一对位于口前的棒状的感觉器官,身体两侧各有四个圆锥形的开口。这些侧孔可能起到排水和废弃物的作用,之后可能进化成后口动物所特有的器官——咽鳃裂。皱囊虫的一些特征跟澄江动物群的古虫动物和古囊动物非常相似。据此推断皱囊虫很可能是已知最古老、最原始的后口动物,或者代表基础动物与后口动物之间的珍稀过渡类群(插图 6)。

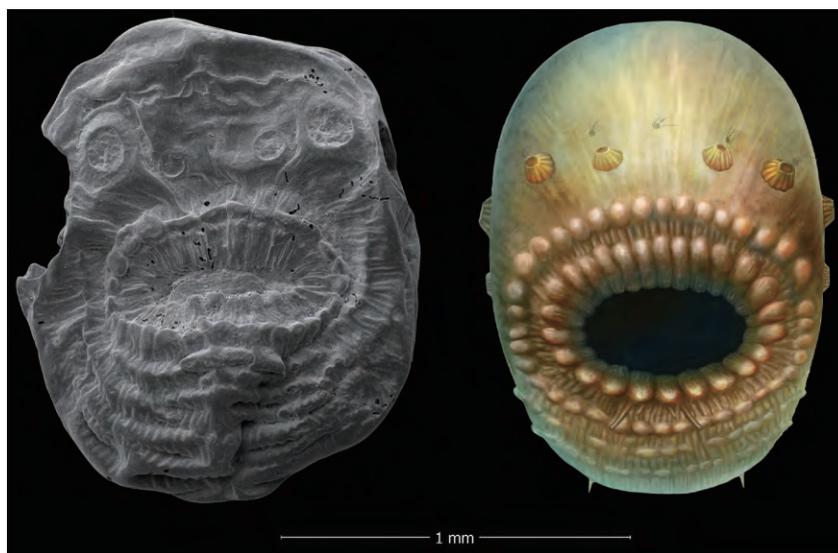


插图 6 陕南寒武系宽川铺组毫米级微型动物化石——冠状皱囊虫,图左为皱囊虫标本,图右为其复原图

这一科学发现具有非常重要的科学意义:1)皱囊虫表面的复杂性证实,正如分子生物学所预测,后口动物的“种子”起源于前寒武纪,这项发现填补了后口动物的化石实证与分子进化钟预测的起源时间之间的鸿沟;2)揭示了两侧对称动物体型在寒武纪逐渐增大的演化规律,两侧对称动物中不同门类的远祖很可能是软躯体的耐受低氧环境微型动物,从而解释了为何目前尚未在前寒武纪地层中发现两侧对称动物的远祖,为研

究寒武纪生命大爆发之谜提供了非常有利的线索;3)新发现引发另外一个新问题,即原口动物和后口动物的肛门是否独立演化形成等一系列学术新命题。

《Nature》的专题评述对这篇文章予以高度肯定,认为该微型化石对于揭示寒武纪生命大爆发之谜至关重要,可以解释为何在前寒武纪地层中难以发现两侧对称动物祖先。Nature News、Science News、Scientific American、《科学时报》等众多主流科学媒体以及 BBC、凤凰网、新浪网等全球几百家社交媒体都以“发现人类远祖至亲”为题进行了专题介绍。据 Altmetric 对全球 220 万篇论文进行统计,该文入选 2017 年度最受全球媒体关注的 100 篇论文;此外,皱囊虫化石(插图 6 左)入选《Nature》杂志 2017 年度最佳科学图片。

该项研究得到国家自然科学基金、国家重点基础研究发展计划(973 计划)、德国洪堡学者基金等项目资助。

论文信息 Han Jian, Conway Morris S, Ou Qiang, Shu De-gan\*, Huang Hai, 2017. Meiofaunal deuterostomes from the basal Cambrian of Shaanxi (China). Nature, 542: 228—231 (\* corresponding author). DOI: 10.1038/nature21072

## 进展五 中国许昌发现晚更新世古老型人类头骨

主要完成者:李占扬、吴秀杰,中国科学院古脊椎动物与古人类研究所

其他完成者:周力平、刘武、高星、年小美、Trinkaus E

科学意义 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所李占扬、吴秀杰研究员率领的研究团队于 2017 年 3 月 3 日《Science》杂志上报道了河南许昌发现的新型古人类头骨化石。研究显示,距今 10.5—12.5 万年,东亚大陆生存着一类具有东亚中更新世直立人、欧洲尼安德特人和早期现代人混合形态的特殊人群。表明晚更新世早期,在中国境内可能并存有多种古人类群体,不同群体之间有杂交或者基因交流产生。许昌人为中国古人类演化的地区连续性以及与欧洲古人类之间的交流提供了一定程度的支持。

进展简介 长期以来,古人类学界对在中国境内发现的中更新世晚期至晚更新世早期过渡阶段古人类成员的演化地位一直存在争议。争论的焦点是:他们是由本地的古人类连续进化而来?还是外来人群的成功入侵者?最近在河南灵井遗址发现的两件距今 10.5—12.5 万年前的古人类头骨化石——许昌人,为探讨这一阶段中国古人类的演化模式提供了重要信息。

2007 年和 2014 年,李占扬研究员领导的考古队在河南省许昌的灵井遗址发现了近 50 件人类头骨碎片化石、万余件古人类制作使用的石器以及 20 余种哺乳动物化石标本。北京大学教育部地表过程分析与模拟重点实验室的周力平教授和年小美博士采用光释光测年法,确定人类化石的生存年代为 10.5—12.5 万年前。

2014 年起,吴秀杰研究员等对许昌人头骨化石开展了研究工作。经过鉴定,确认这些头骨碎片代表 5 个个体,其中 1 号和 2 号个体相对较为完整:许昌 1 号由 26 块游离的头骨碎片组成,复原后的头骨保留有脑颅的大部分及部分底部,代表一个年轻的男性个体;许昌 2 号头骨由 16 块游离的碎片拼接而成,复原后的头骨保存有脑颅的后部,为一较为年轻的成年个体(插图 7)。

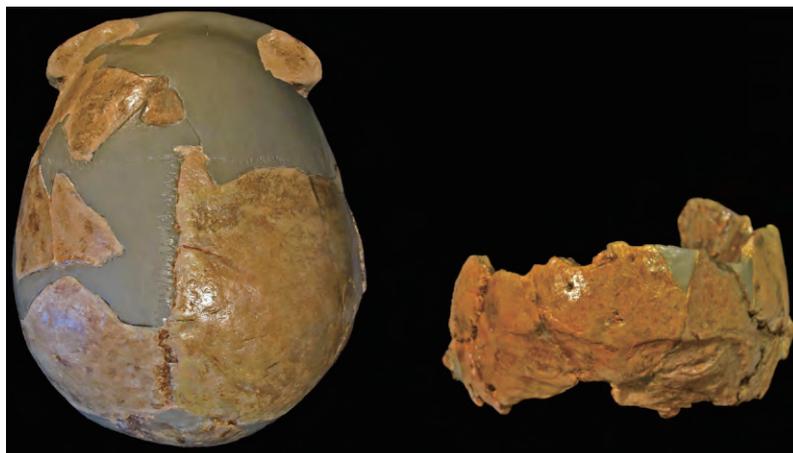


插图 7 许昌 1 号(左)和 2 号(右)头骨

研究小组采用形态观测、高清晰度 CT 扫描、手工及三维虚拟复原等手段,对许昌人头骨进行了拼接和复原,分别制作了 1 号和 2 号人头骨虚拟及实体的复原头骨及颅内模。在此基础上,对许昌人头骨形态特征、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。研究发现,许昌人头骨呈现复杂的混合及镶嵌性形态特征:1) 脑颅的扩大和纤细化:1 号头骨的颅容量约为 1800 cc,2 号头骨虽然小于 1 号,但也位于晚更新世人类的平均值附近。骨壁变薄,颅形圆隆,枕圆枕弱化,眉脊厚度中等。从中更新世到晚更新世早期,人类脑量具有增大及纤细化的演化趋势,许昌头骨明显扩大的脑量符合这一演化特点,进一步证实这一时期的人类具有相似的演化模式;2) 具有东亚中更新世直立人的原始及共同特征:包括低矮的头骨穹隆、扁平的脑颅中矢状面、最大颅宽的位置靠下、短小并向内侧倾斜的乳突。许昌人头骨具有东亚古人类一些原始特征及若干共同的形态特征,提示从更新世中、晚期,东亚古人类可能具有一定程度的连续演化模式;3) 具有与典型的尼安德特人相似的两个独特性状:一个性状表现在项区,包括不发达的枕圆枕、不明显的枕外隆突伴随其上面的凹陷;另外两个性状是内耳迷路的模式,前、后半规管相对较小,外半规管相对于后半规管的位置较为靠上。这两个独特性状,其中一个性状(枕圆枕上凹/顶部形态)在东亚早期人类头骨不清楚;另外一个特征(内耳迷路比例)在东亚古人类只出现了 1 例。许昌头骨在枕圆枕上凹和颞骨内耳迷路半规管的形态上与欧洲的尼安德特人相似,暗示了两个人群之间基因交流的可能性。

许昌人头骨具有的这种混合性,尤其是镶嵌性头骨形态特征,反映东亚更新世人类演化特点既具有一般性的趋势,同时还呈现一定程度的地区连续性以及与其它地区古人类之间的交流。目前还无法将其归入任何已知的古人类成员之中,许昌人可能代表一种新型的古人类。这项研究填补了古老型人类向早期现代人过渡阶段中国古人类演化上的空白,表明晚更新世早期中国境内可能并存有多种古人类成员,不同群体之间有杂交或者基因交流。

论文信息 Li Zhan-yang, Wu Xiu-jie\*, Zhou Li-ping, Liu Wu, Gao Xing, Nian Xiao-mei, Trinkaus E, 2017. Late Pleistocene archaic human crania from Xuchang, China. *Science*, **355**(6328): 969—972 (\* Correspondence author). <http://science.sciencemag.org/content/355/6328/969>

## 进展六 地质微生物记录海洋和陆地的极端环境事件

主要完成者:谢树成,中国地质大学(武汉)

其他完成者:唐长燕、杨欢、Algeo T J、Pancost R D

科学意义 地质时期的细菌和古菌等微生物很难开展研究,而它们记录的古气候古环境信息更难识别,因而需要技术手段与研究方法的创新。谢树成教授等在利用地质微生物研究陆地极端干旱事件和海洋极端环境事件方面取得突破,发现地质微生物不仅能够识别 2.52 亿年前引起最大生物灭绝的恶劣古海洋环境,而且能够识别最近 35 万年以来陆地发生的大干旱事件(插图 8)。这两项成果显示了小小微生物能够诉说地球大灾难,为古生物学服务全球变化领域开拓了新方向。两篇成果发表于 2017 年的《*Earth and Planetary Science Letters*》杂志。

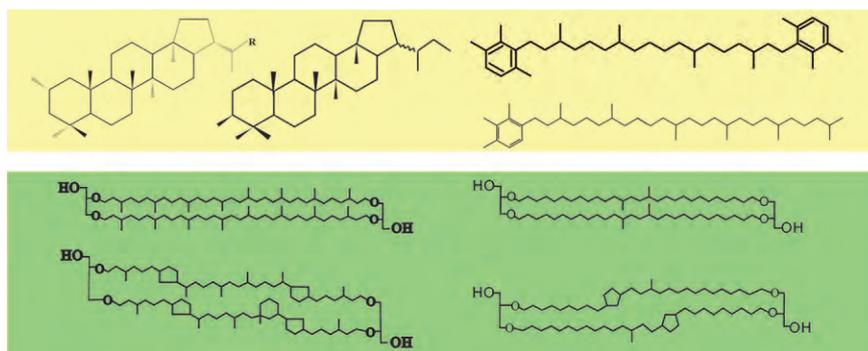


插图 8 分别从岩石和沉积物中检测出来示踪极端海洋环境(上,黄色背景)和陆地大干旱(下,绿色背景)的地质微生物脂类分子结构图

**进展简介** 保存在岩石中的古代细菌和古菌等微生物化石看不见摸不着,很难开展深入研究。这些微生物没有很好的结构多样性,不能像动物化石和植物化石那样可以从形态上开展研究,而只能从分子和同位素水平进行探索,因而需要现代化技术手段的创新。同时,地质微生物因处于生态系统食物链的底层而对气候环境变化相当灵敏,可以用来示踪地质时期的气候环境变化。然而,地质微生物记录的古气候古环境信息也很难识别,因而需要研究方法的创新才能取得突破。中国地质大学(武汉)谢树成领导的分子地球生物学研究团队通过技术与方法的创新,对保存在岩石和沉积物中的痕量地质微生物脂类分子进行深入研究,发现地质微生物很好地指示了 2.52 亿年前导致生物大灭绝的恶劣古海洋环境。不仅如此,地质微生物还清晰地记录了新生代我国西北地区发生的一些大干旱事件。这两项研究成果均展示了小小微生物可以诉说地球大灾难这一场景,为古生物学服务全球变化领域开拓了新方向。研究成果于 2017 年以两篇论文形式发表在《Earth and Planetary Science Letters》上。

2.52 亿年前的二叠纪-三叠纪之交发生了显生宙最大的生物灭绝事件。生物是如何灭绝的?什么环境因素能够导致如此严重的大灭绝?这些问题一直是国际研究的热点和难点。中国地质大学(武汉)地层古生物学研究集体长期以来对这些事件开展了系统研究,谢树成等团队成员在 2016 年获得了该集体的第三个国家自然科学基金二等奖以后,继续从地质微生物角度对这一大灭绝事件和相邻的另一次生物大灭绝事件(中二叠世-晚二叠世之交)开展对比研究,发现地质微生物能够识别引起这两次生物大灭绝的古海洋环境差异:地质微生物记录了古海洋环境在二叠纪-三叠纪之交远比中二叠世-晚二叠世之交恶劣,从而解释了这两次生物大灭绝不同灭绝程度的环境致因。同时,地质微生物功能群还能识别那次最大生物灭绝中造成不同灭绝幕的古海洋环境差异:在二叠纪-三叠纪之交的两幕生物大灭绝中,地质微生物显示古海洋环境在第二幕(早三叠世)比第一幕(二叠纪最末期)更加极端,海水缺氧和硫化程度明显加剧,导致了固氮细菌和绿硫细菌的大发展,从而也解释了这次生物大灭绝两幕不同灭绝程度的环境致因。小小微生物能够诉说海洋大灾难。

未来是否会出现全球变暖是当前人们最关注的问题之一,而全球变暖是否会导致旱灾与洪灾频发更是人们所关注的焦点问题。要对地球未来气候进行准确预测,首先需要了解地质时期这些旱灾和洪灾发生的规律。然而,地质时期的旱灾等极端气候事件很难开展研究,因为缺乏记录这些事件的代用指标。谢树成领导的科研团队继 2017 年初在《PNAS》上发表了最近一万年以来厄尔尼诺引发的长江中游暴雨事件的基础上,此次则从地质微生物角度对我国西北地区的大干旱事件开展研究。黄土高原最近 35 万年以来的细菌和古菌脂类分子显示,在每次冰期的最末期都出现了大干旱事件。更为重要的是,他们发现这些大干旱事件明显不同于人们已经熟知的东亚冬季风造成的一般冰期的干旱事件,可能是由热带海区类厄尔尼诺现象引发的。这是第一次从地质微生物角度发现了由热带海-气相互作用所引发的大干旱事件,显示了地质微生物在全球变化领域具有广阔的应用前景。小小微生物能够诉说陆地大灾害。

**论文信息** 1) Xie Shu-cheng, Algeo T J, Zhou Wen-feng, Ruan Xiao-yan, Luo Gen-ming, Huang Jun-hua, Yan Jia-xin, 2017. Contrasting microbial community changes during mass extinctions at the Middle/Late Permian and Permian/Triassic boundaries. *Earth and Planetary Science Letters*, **460**: 180—191; 2) Tang Chang-yan, Yang Huan, Pancost R D, Griffiths M L, Xiao Guo-qiao, Dang Xin-yue, Xie Shu-cheng\*, 2017. Tropical and high latitude forcing of enhanced megadroughts in Northern China during the last four terminations. *Earth and Planetary Science Letters*, **479**: 98—107 (\* Correspondence author).

## 进展七 1.3 亿年前早期鸟类化石揭示尾骨与尾羽独立演化

**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:**O'Connor J K, 泮燕红、周忠和

**科学意义** 由中国科学院古脊椎动物与古人类研究所王敏副研究员所属的研究团队于 2017 年 1 月 31 日的《Nature Communications》杂志上报道了有关原始鸟类尾骨和尾羽演化的重要发现。在恐龙向鸟类的演化过程中,尾骨变化最为显著,然而这一过程并不清楚。现代鸟类的尾骨缩短成犁状的尾综骨,其上附有扇状尾羽而构成飞行的重要组成部分。学术界普遍认为犁状尾综骨和扇状尾羽是同步演化的。王敏等人报道了在河北白垩纪地层中发现的反鸟类多齿颌羽鸟,其尾骨与现代鸟类相似,但尾羽并非扇状,据此提出“犁

状尾综骨与扇状尾羽在早期鸟类中相互独立”的假设,挑战了此前长期占主流的学术观点。

**进展简介** 近十年来,中国科学院古脊椎动物与古人类研究所周忠和团队报道了大量发现于辽宁、河北等地区白垩纪地层中的原始鸟类,揭示了从恐龙演化而来的鸟类是如何迅速演化的,特别是喙囊、食团等的发现,极大丰富了对早期鸟类重要生物学特征的认识。中生代的鸟类可以分为三个大的类群:“基干鸟类”、反鸟类和今鸟型类。“基干鸟类”较今鸟型类和反鸟类原始,但并不是一个自然的分类单元。反鸟类是中生代鸟类演化最为成功的类群,构成今鸟型类的姐妹群,所有的现生鸟类都是从今鸟型类演化而来。反鸟类的化石在除南极洲以外的所有大陆都有发现。最早的化石记录可追溯到 1.3 亿年前,直到白垩纪末期的生物大灭绝事件中消失,其广泛的地理分布和长的演化时间,说明反鸟类是鸟类演化史上最早的发生大规模辐射演化的类群。

在恐龙向鸟类的演化过程中,尾骨的变化最为显著。不同于恐龙所具有的长尾骨,现生鸟类的尾骨显著缩短,特别是最后几枚尾椎愈合成一个尾综骨。现生鸟类的尾综骨在侧视时呈犁状,其表面附有肌肉和纤维脂肪而能够控制扇状尾羽的展开和闭合,构成飞行的重要组成部分。此前,这样的犁状尾综骨仅出现在今鸟型类,而扇状尾羽也多在今鸟型类中发现;相反,在反鸟类和其它更为原始的鸟类中(如孔子鸟和会鸟),尾综骨形态结构单一而呈长杆状,特别是末端没有向背侧弯曲,相对长度明显大于今鸟型类,因此它们的尾综骨仅仅是尾骨缩短的结果,而扇状尾羽也很少在这些鸟类中发现。因此,现代鸟类学家和古生物学者普遍认为犁状尾综骨和扇状尾羽是同时出现的。

在 2017 年 1 月 31 日出版的《Nature Communications》杂志上,中国科学院古脊椎动物与古人类研究所王敏等人报道了在河北四岔口盆地距今约 1.3 亿年发现的一类奇特反鸟类——多齿胫羽鸟(插图 9)。虽然属于目前已知最古老的反鸟类之一,多齿胫羽鸟保存了很多进步的特征,包括胸骨后缘具有两对突起、小翼指退化、腓骨与尾综骨缩短等,明显区别于同层位发现的其它鸟类;其下颌具有多达 14 枚牙齿,代表目前已知下颌齿数最多的反鸟类,揭示了大量的形态分异在反鸟类演化初期就已经出现了。更为重要的是,该化石的发现挑战了有关尾骨和尾羽的同步演化的假说。多齿胫羽鸟的尾综骨显著缩短,相对长度与今鸟型类相近。但其尾综骨的末端向背侧弯曲,从而形成了和今鸟型类完全相同的犁状尾综骨。王敏等利用判别分析构建中生代鸟类尾综骨的形态空间,也证实了多齿胫羽鸟的尾综骨与今鸟型类尾综骨的形态更为接近。然而,多齿胫羽鸟并不具有扇状尾羽,它的尾羽均是非羽片状,表明今鸟型类的尾综骨通过平行演化的方式至少在一类反鸟类中出现,而“犁状尾综骨——扇状尾羽的协同演化”假说需要重新思考。

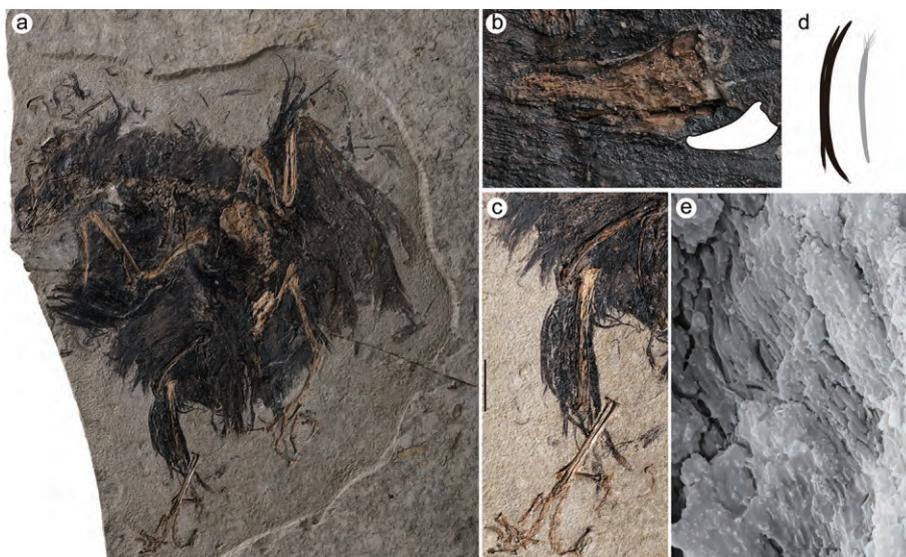


插图 9 早白垩世反鸟类多齿胫羽鸟

a. 多齿胫羽鸟正型; b. 犁状尾综骨; c. 后肢羽毛照片; d. 羽毛形态复原; e. 扫描电镜下的后肢羽毛色素体。

多齿胫羽鸟具有一类奇特的后肢羽毛。这些羽毛长约整体呈线状,但是在其最末端却分散出细小的分支。这些细小的末端分支代表了单一的羽支,这些羽支的主要部分愈合而成羽轴,仅在末端发散开来。鸟类

后肢羽毛主要为两种形态:羽片状和绒羽状;而上述多齿胫羽鸟的后肢羽毛不同于所有已知的现生或着化石羽毛的形态结构,代表了羽毛演化中一类绝灭的羽毛形态——近端线状而具有丝状的末梢分枝。通过对多齿胫羽鸟羽毛进行扫描电镜观察,发现这一奇特后肢羽毛的色素体形态明显不同于身体其它部位的羽毛,而色素体的几何形态与其颜色是相关的,表明这些后肢羽毛具有不同的颜色。多齿胫羽鸟的后肢羽毛显然不具有空气动力学作用,而其不同于绒羽的结构说明其保温/隔热的作用有限,因此这样的羽毛可能用于吸引异性,这也与色素体所反映的不同颜色相互佐证,表明性选择在鸟类演化早期扮演了重要角色。

此外,多齿胫羽鸟还提供了其他重要的特征演化信息,如腓骨的缩短代表了这一进步特征在鸟类演化中的最早出现。对其骨骼显微结构的观察分析,研究者推测多齿胫羽鸟能够在一年左右的时间达到成年,不同于其它反鸟类所具有的缓慢生长模式。通过对中生代鸟类系统发育关系的研究,多齿胫羽鸟被归入较为进步的反鸟类,这与其相对古老的层位不一致。通过对主要支系分异时间的估算,由于多齿胫羽鸟的发现,使得早白垩世主要鸟类支系的起源和分异时间要比之前的认识提早很多。

论文信息 Wang Min, O'Connor J K, Pan Yan-hong, Zhou Zhong-he, 2017. A bizarre Early Cretaceous enantiornithine bird with unique crural feathers and an ornithuromorph plough-shaped pygostyle. *Nature Communications*, 8: 14141. DOI: 10.1038/ncomms14141.

## 进展八 解密最古老树木的生长模式

主要完成者:徐洪河,中国科学院南京地质古生物研究所

其他完成者:Berry C M、Stein W W、王恽、唐鹏、傅强

科学意义 由中国科学院南京地质古生物研究所徐洪河研究员所带领的研究团队于 2017 年 10 月 23 日在《PNAS》上报道了代表地球上最古老树木的硅化保存化石,理论性地识别出了地球上最早构成森林植物的生长机理。本项研究基于我国新疆塔城和美国纽约州的化石材料,运用植物解剖学研究方法,首次识别出了世界上最古老树木的内部解剖结构特征,并为最古老树木的生长方式建立了理论模型。该研究是基于描述性古生物学所开展的演化与理论研究,对于探讨陆地生态系统的发展与完善具有重要的指示意义。论文发表以来,在多平台、多媒体以及学术界产生了显著的影响。

进展简介 陆地生态系统的形成是地质历史时期的重大事件,其对于包括人类在内的所有陆地生物的起源和演化都具有不可替代的作用。这一关键的事件发生在距今约 3.8 亿年的泥盆纪。

森林的形成对于陆地生态系统的发展与完善至关重要。森林显著改变了环境,泥盆纪时期,大气二氧化碳浓度发生了大幅度的降低,最早的四足动物开始了陆地生活,陆地生态系统逐渐完善。

地球上最早的森林出现于距今约 3.8 亿年的中泥盆世,分布于当时的各大主要陆块。最早的森林主要由三类植物所构成:1)乔木型石松类;2)前裸子植物中的古羊齿类;3)枝蕨类。对这三类植物,欧美学者已经开展了大量研究工作,对一些具有乔木性状的属种开展了形态学和解剖学研究,对它们的生长模式也进行了理论性的模型重建与复原。而我国中—晚泥盆世植物群是以石松类占优势,无论是低矮的草本还是高大的树木类型,在我国泥盆纪的化石记录中都有报道和研究。对于泥盆纪古羊齿类化石的研究,目前国内外学者已经做了大量的工作,构成泥盆纪森林的古羊齿类植物具有类似于现代松柏类植物的内部解剖结构。其他类群植物资料稀少,研究程度相对较低。

我国北方区中泥盆世植物研究依据了大量压型化石材料,缺乏矿化材料的发现与研究。构成泥盆纪森林的植物往往外形相似,而内部解剖结构却差别迥异。此前学者研究报道了北美泥盆纪枝蕨类植物所构成的森林,学者们仅根据铸型和压型化石标本研究了这类植物的形态学特征,由于缺乏化石证据而无法识别其内部结构特征,因此也无从得知这种植物如何完成加粗生长。

枝蕨类早在中泥盆世早期就已经出现,乔木类型也有多处化石记录,尽管世界各国学者开展了数十年之久的研究工作,对于枝蕨类植物的生长方式一直无从得知。美国纽约州中泥盆世晚期地层中曾报道有直径可达 1 m 的砂岩铸型标本,其代表了中泥盆世枝蕨类 *Eospermatopteris* 树木的基部,但是,该化石仅仅保存了非常有限的木质部细胞。主要原因可能是 1)该植物并没有次生生长,所以没有次生木质部,因此也无法保存成为化石;2)该植物在保存成为化石的过程中植物组织完全被破坏了。

在这种情况下,通过研究保存有解剖结构的矿化材料,识别晚泥盆世乔木状植物的内部结构就显得尤为重要。对植物解剖结构的研究是泥盆纪植物复原、重建和综合研究的重要内容,也是泥盆纪植物学在理论古生物学和演化生物学领域所不可替代的方面。

植物体构成树木必须要具有明显的加粗生长,即次生生长。而在本项研究成果之前,无法完成对泥盆纪枝蕨类生长模式的研究。新疆塔城地区中一晚泥盆世地层发育连续,出露广泛。中泥盆世地层中已经报道和研究了一定数量的压型植物化石,对它们的地质时代也已经通过植物微体化石(分散孢子)和火山碎屑岩锆石进行了研究和厘定。我们还发现了难能可贵的硅化保存的化石,这为开展远古树木生长模式研究奠定了基础。

新疆硅化保存的枝蕨类植物被命名为 *Xinicaulis lignescens*, 该属名的含义为“新疆的茎干”,种本名的含义是“木本型”。该名称主要说明了本研究中化石发现的产地特征以及生物学独特性。*Xinicaulis* 最大直径达 70 cm,是最早的硅化木,其内部结构独特,至少 30 枚独立的茎维管束交错排列,构成双环状的圆柱形维管束群,维管束群外围布满了根(插图 10),这些维管束均具有明显的次生木质部和加粗生长,也具有生长轮(年轮)。此类枝蕨类植物的茎维管束彼此交错成复杂的立体网格,植物体在生长过程中,通过增大单个茎维管束的直径以及不断分生出新的根而改变维管束群的立体网格结构,进而完成加粗生长,同时,植物也变得越发高大。构成早期森林的枝蕨类植物这种加粗生长的方式与现代植物中的某些单子叶植物具有一定的相似性。

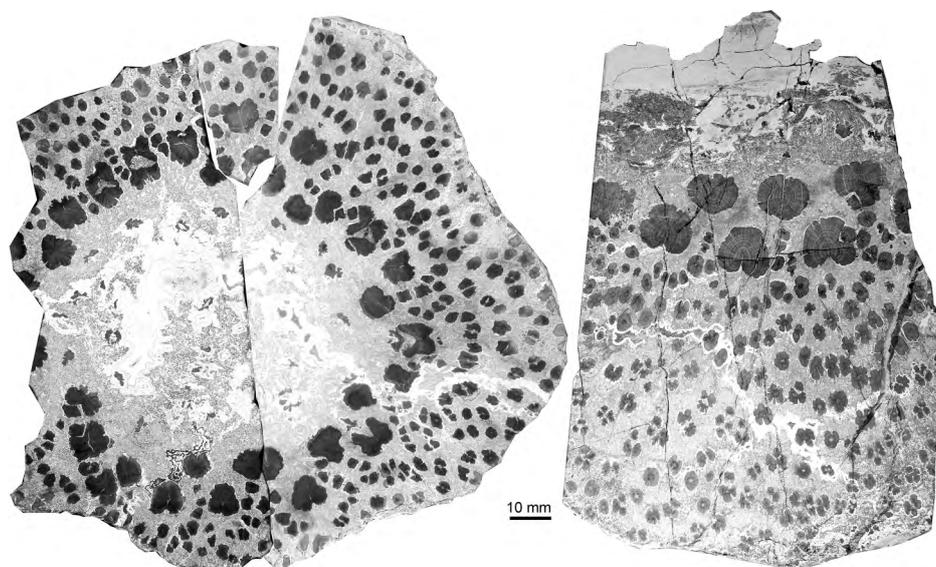


插图 10 新疆塔城地区晚泥盆世枝蕨类植物 *Xinicaulis* 茎干横切面,左图为一个较小树干的完整横切面,右图为一个较大树干的局部

本项研究虽然基于新疆泥盆纪植物化石,但是新疆的枝蕨类植物 *Xinicaulis* 具有真正的次生木质部,能够实现真正的加粗生长,根据 *Xinicaulis* 所建立的生长模型可以适用于构成地球上最早森林的所有枝蕨类植物。该研究对于古植物学以及植物学演化研究均具有重要的参考意义。

论文信息 Xu Hong-he, Berry C M, Stein W W, Wang Yi, Tang Peng, Fu Qiang, 2017. Unique growth strategy in the Earth's first trees revealed in silicified fossil trunks from China. PNAS, 114: 12009—12014. DOI: 10.1073/pnas.1708241114

## 进展九 缅甸琥珀中隐翅虫化石揭示白垩纪蘑菇多样性及最早的社会性寄生

主要完成者:蔡晨阳、黄迪颖,中国科学院南京地质古生物研究所

其他完成者:Leschen R A B、Newton A F、Hibbett D S

科学意义 由中国科学院南京地质古生物研究所蔡晨阳博士等于《Nature Communications》和《Current Biology》杂志发表论文,通过对一亿年前缅甸琥珀中昆虫和蘑菇的研究,揭示白垩纪蘑菇多样性和社会

性寄生现象。不仅发现了多种罕见的蘑菇化石,直接证明伞菌的多样性,还从隐翅虫的形态功能学研究入手,间接揭示蘑菇的早期多样性,并将蘑菇演化历史推前 2500 万年。寄生白蚁巢穴的蟹客代表已知最早的社会性寄生昆虫。该发现对认识白垩纪生态系统中昆虫与真菌以及昆虫之间的复杂关系具有重要的意义。

**进展简介** 蘑菇是一类大型、种类繁多的高等真菌,隶属担子菌门,伞菌纲。食用真菌多属这类,如香菇、牛肝菌等。蘑菇的生活周期很短,且质地柔软,缺乏几丁质表皮或矿化壳体,也不具备高等植物的维管束结构,很难保存为印痕化石。目前已知的蘑菇化石均来自琥珀,共描述 5 种蘑菇化石,其中 3 例来自中新世多米尼加琥珀(约 2000 万年前),两例分别来自白垩纪新泽西琥珀(约 9000 万年前)和缅甸琥珀(约 1 亿年前)。人们对蘑菇的早期演化历史,特别是中生代演化史知之甚少。最早的蘑菇发现于缅甸琥珀,但标本保存欠佳,仅保存了伞盖部分。蔡晨阳、黄迪颖等在收集的 2 万多枚缅甸琥珀标本中发现了多个保存完好的小型蘑菇,提供了中生代伞菌多样性的直接证据。这些蘑菇包含 4 个新类型,均属于伞菌纲伞菌目,极大地丰富了白垩纪蘑菇的多样性。更有趣的是,研究人员还在缅甸琥珀中发现了多种形态特殊的甲虫,即巨须隐翅虫(插图 11)。现代所有的巨须隐翅虫(约 100 种)都是严格以蘑菇为食的昆虫,而不同的甲虫类型取食不同种类的蘑菇。琥珀中的巨须隐翅虫形态特征上与现代类型十分相似,尤其是它们高度特化的口器:下唇须末端呈斧状,端部布满细小的嗅觉感受器,用以探寻蘑菇并判断它们的新鲜程度;它们的上颚内侧呈锯齿状,用以切割和取食蘑菇。在缅甸琥珀中共发现 3 种巨须隐翅虫,这也从另一个角度暗示了蘑菇种类的多样性。此外,通过对白垩纪早期热河生物群(约 1.25 亿年前)中的巨须隐翅虫的重新研究,发现它们也具有类似特化的口器,旁证了早白垩世蘑菇的多样性,并将蘑菇的演化历史提前了 2500 万年。研究成果发表于《Nature Communications》杂志。



插图 11 白垩纪中期巨须隐翅虫与蘑菇的生态复原图

自然界中社会性昆虫(如蚂蚁、白蚁和蜜蜂)与其他动物之间存在十分密切的关系。昆虫之间互相利用,从而使得一方或双方得以更好地利用资源、获得保护、适应环境和占领新的生境。白蚁是目前已知最为古老的社会性昆虫,其社会性起源于侏罗纪晚期,显著早于其他社会性昆虫。白蚁巢穴中也常寄居有种类多样、形态特化的动物(主要为昆虫),有些离开蚁巢则无法生存,它们被称之为蟹客(wèi kè),这种现象可称为社会性寄生。通过长期而复杂的演化适应,蟹客能够侵入隐蔽的白蚁巢穴,利用巢穴内适宜稳定的环境、丰富营养的食物,并能获得蚁穴这一天然屏障的有效保护。蟹客生活在较为封闭的白蚁巢穴中,化石记录极其稀少。目前已知确信的蟹客化石全部来自中新世的多米尼加和墨西哥琥珀(约 1900 万年前)。蔡晨阳、黄迪颖等在缅甸琥珀中发现 2 枚形态极其特化的的隐翅虫化石,这类甲虫可明确归入现生的严格寄生白蚁巢穴的毛蟹隐翅虫族(前角隐翅虫亚科)。它们体型较小,具有典型的“似蜚”的防御体型,头部、触角和足等身体构

造均可收缩到身体的腹面,从而起到自我保护作用。通过古今昆虫形态对比研究,证明其代表已知最古老的社会性寄生昆虫,将蟹客化石记录推前了约 8000 万年。中生代首例蟹客的发现不仅说明了白蚁的社会性在白垩纪中期已经形成,而且证明社会性昆虫的巢穴在其演化的早期阶段已经被其他动物所利用。研究成果发表于《Current Biology》杂志。

论文信息 1) Cai Cheng-yang, Leschen R A B, Hibbett D S, Xia Fang-yuan, Huang Di-ying\*, 2017. Mycophagous rove beetles highlight diverse mushrooms in the Cretaceous. *Nature Communications*, 8(14894): 1—7. <https://www.nature.com/articles/ncomms14894>. (\* Correspondence author); 2) Cai Cheng-yang, Huang Di-ying, Newton A F, Eldredge K T, Engel M S, 2017. Early evolution of specialized Termitophily in Cretaceous rove beetles. *Current Biology*, 27(8): 1229—1235. [http://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822\(17\)30278-6](http://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822(17)30278-6).

## 进展十 晚二叠世木材蛀孔展示了一个复杂的生态关系网络

主要完成者:冯卓,云南大学深时陆地生态研究所

其他完成者:王军、Rößler R、Ślipiński A、Labandeira C

科学意义 云南大学深时陆地生态研究所冯卓研究员率领的国际团队于 2017 年 9 月 15 日在《Nature Communications》杂志发表了晚二叠世蛀木甲虫生态学的重要研究成果。人们对地质历史时期昆虫生态学的认识十分有限。冯卓等人首次报道了晚二叠世蛀木甲虫在松柏类植物茎干中高度复杂化的蛀孔构造,发现了蛀木甲虫特殊的取食行为和发育过程中显著的食性转变现象。该研究不仅为深入认识化石昆虫生态、植物与昆虫协同演化提供了证据,同时也为探索昆虫的社会化和“农业化”现象的起源提供了线索。

进展简介 植物和昆虫是多样性最高的两类宏体生物,共占现生陆地生物分异度的近 3/4。它们以多种方式相互作用,不仅构成了陆地生态系统的重要组成部分,亦形成了今天五彩缤纷的自然世界。但由于缺乏化石证据,植物与昆虫之间复杂多样的相互关系是如何建立起来的、并在地质历史时期中经历了怎样的协同演化过程,还存在许多未解之谜。其中,尤其是昆虫的社会化和“农业化”现象的起源一直是古生物学、进化生物学和昆虫生态学关注的热点科学问题。

云南大学深时陆地生态研究所冯卓团队经过长期的野外工作,在北贺兰山地区采集了 100 余棵保存精美的二叠纪矿化裸子植物化石。利用连续切片法,对其中晚二叠世(大约距今 2.53 亿年前)松柏类植物茎干标本中立体保存的甲虫蛀孔开展了系统的解剖学研究。他们发现甲虫幼虫的蛀孔最开始出现在茎干的形成层位置,之后逐渐延伸到木材内部,最后又从木材穿过形成层和皮层。蛀孔在不同植物组织间连续延伸表明蛀木甲虫存在特殊的取食行为,即甲虫幼虫最开始取食形成层组织,进而取食木质部组织,然后重新取食形成层组织,最后取食树皮组织。通过对蛀孔中保存的大量甲虫口器化石以及甲虫粪便颗粒形态、大小和内含物的深入分析,他们证明甲虫在发育过程中经历了多个生长阶段,而且在从小长大的生长过程中所取食的食物完全不同,即甲虫食性随着个体发育过程发生显著转变。由于不同植物组织的化学成分和化学结构存在巨大差异,因此,食性转变需要不同的机制来消化食物和吸收营养。冯卓等研究发现蛀孔内不仅存在大量真菌菌丝化石,且蛀孔周围的植物细胞存在明显的真菌降解结构。由于降解之后的木材细胞更容易被甲虫消化和吸收,所以蛀木甲虫可能通过“培育”蘑菇来帮助自己实现对不同植物组织的取食行为。这种有趣的现象暗示当时的蛀木甲虫也许已经学会了“培育”真菌——即实现了“农业化”(插图 12)。

除了真菌化石,冯卓等在甲虫蛀孔里识别出至少三种甲虫、两种螨类以及一种蟹肢类等多种节肢动物化石。这么多不同类群的生物之间构成了一个非常复杂的生态关系网络。现生蛀木甲虫生态学研究表明,蛀木甲虫的成虫和幼虫通常在蛀孔里共同生活很长一段时间,并形成一种亚社会化的生活方式。在此期间,成虫对幼虫起到一定的保护作用,即成虫和幼虫之间存在一定的社会分工。当前蛀孔中捕食性螨类和蟹肢类节肢动物的存在,证实了二叠纪晚期蛀木甲虫已出现初步的社会分工。

令人惊讶的是,蛀孔中还保存了甲虫和螨类的卵壳。卵壳是很容易被降解的物质,只有在极其特殊的保存条件下才能够形成化石。冯卓等所研究的材料是由硅渗矿化作用形成的化石标本,可能由于这些化石是在极短的时间内形成的,所以才保存了如此精美的解剖结构。

冯卓团队的研究结果表明,晚古生代甲虫已演化出高度复杂的行为方式和生态关系。然而,类似的甲虫生活方式和生态关系一直到白垩纪早期才再次出现在化石记录中。因此,二叠纪末生物大绝灭事件可能严重影响了甲虫的演化历史,使甲虫高度复杂的行为方式和生态关系的演化进程中断,直到 1 亿 2 千万年之后的白垩纪早期才得以恢复。该研究为化石昆虫生态学、植物与昆虫协同演化、昆虫的社会化和农业化现象提供了重要线索。论文发表后,随即被自然指数(Nature Index)作为亮点成果进行了为期两个月的重点推荐,亦得到新华社等媒体的关注和报道。

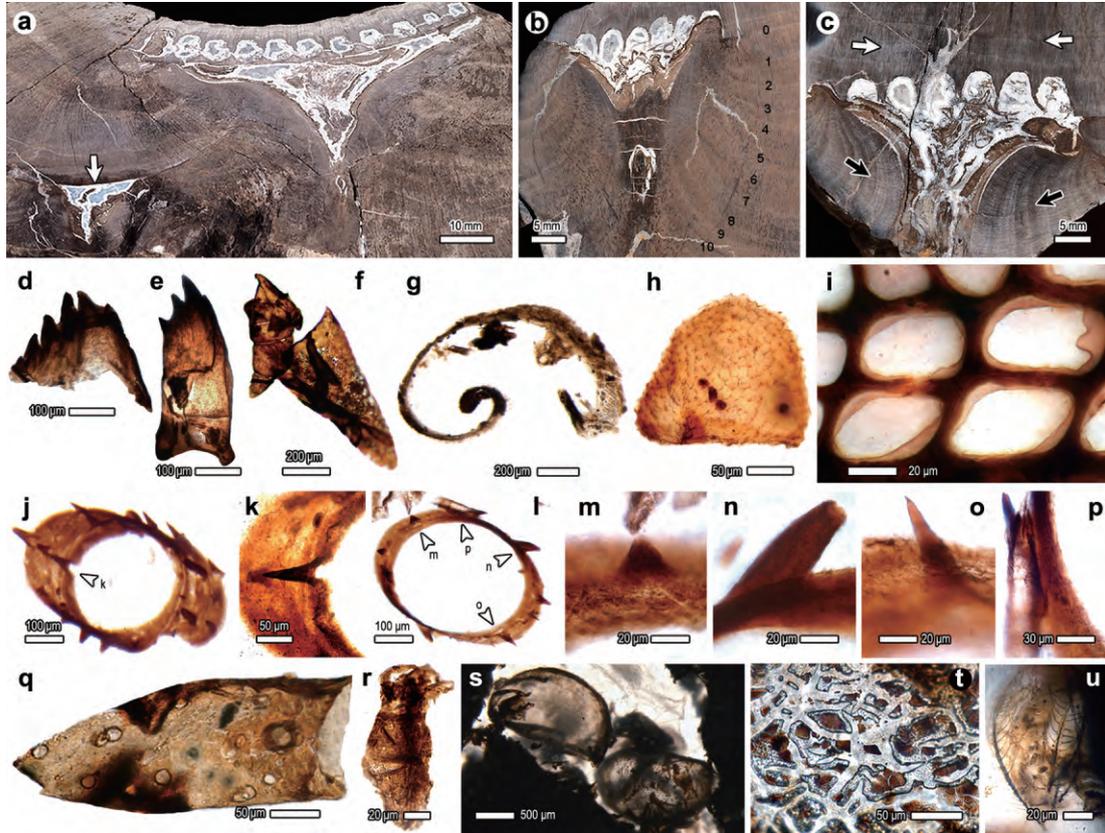


插图 12 晚二叠世松柏类植物茎干中的甲虫蛀孔,以及蛀孔中保存的多种生物结构

a. 同一茎干中的两组甲虫蛀孔,图片上方为包括 11 个幼虫蛀孔的一组甲虫蛀孔,蛀孔下方的三角形区域为植物的伤愈结构;箭头所指为另一组蛀孔。b. 展示包括 6 个幼虫蛀孔的一组甲虫蛀孔;数字表示蛀孔形成之后的生长轮。c. 展示包括 7 个幼虫蛀孔的一组甲虫蛀孔;白色箭头显示蛀孔形成前树木生长轮的正常生长方向,黑色箭头显示蛀孔形成后生长轮的生长方向。d. 甲虫成虫大颚。e. 甲虫幼虫大颚。f. 早龄甲虫幼虫大颚。g. 表皮碎片。h. 甲虫的卵壳。i. 被真菌腐蚀的植物管胞分子。j—p. 带刺的胫节或腿节。q. 螯肢类骨片。r. Pygmephoridae 螨。s. 甲螨壳。t. 甲螨壳局部放大,显示真菌腐蚀结构。u. 真菌菌丝。

论文信息 Feng Zhuo, Wang Jun, Rößler R, Ślipiński A, Labandeira C, 2017. Late Permian wood-borings reveal an intricate network of ecological relationships. *Nature Communications*, 8: 556. DOI: 10.1038/s41467-017-00696-0.

(中国古生物学会秘书处)