



## 科学家揭秘琥珀中白垩纪昆虫真实颜色 这些昆虫为何穿越亿年仍能“自带光芒”

本报记者 金凤

从孔雀羽毛的艳光四射,到毒箭蛙的明亮警告色,再到北极熊的白色伪装。动物王国里,生活活虎的动物们用各种体色,掩饰各种“心机”。

昆虫是地球上物种数量最多的生物,展现了极其丰富的颜色。它们的颜色分为色素色和结构色,具有金属光泽的甲壳虫、蝴蝶或飞蛾闪闪发光的鳞片,都是典型的结构色。不过,当这种绚烂融入化石,便从此黯淡无光。

目前,化石中很少保有生物的色彩细节,地

质历史中原始的结构色的证据极其罕见,大多数古生物复原原因都是根据艺术家的想象重建。

近日,中国科学院南京地质古生物研究所(以下简称中科院南古所)科研团队揭开了近1亿年前的昆虫真实色彩的秘密。他们对白垩纪缅甸琥珀中具有金属色彩的昆虫进行系统研究后发现,纯净而强烈的颜色可直接在昆虫体表保存下来,奥秘就隐藏在昆虫体表内一种特殊的纳米结构中。相关研究于近日在线发表于英国《皇家学会会刊-B辑》上,这为了解白垩纪雨林中与恐龙共存的昆虫提供了新的视角。

的鳞片会产生银色或金黄色。

2010年,中国、英国和爱尔兰等三国科学家,曾在《自然》刊文称,他们在中国热河生物群的鸟类和带毛的恐龙中发现两种黑色素体,并

将黑色素体的形状和排列方式,与现代鸟类做对比后推测,这些带毛的恐龙和古鸟类的身体已经具有以灰色、褐色、黄色及红色为主要色彩的基础。

### 多层反射膜让昆虫颜色保存亿年

如何从结构色中发现远古昆虫的颜色之谜,对蔡晨阳来说,源自2015年的一次启发。那年,他在美国一家博物馆看到桌上摆放着给小朋友科普用的昆虫标本,是介绍色素色和结构色的,他顿时被吸引住了。回国之后,他开始了手整理琥珀中昆虫体表有金属光泽的样本。

历经多年,他和中科院南古所燕红研究员带领的研究团队从距今9900万年的白垩纪中期约4万枚琥珀中,挑选出35枚化石。这些化石全部来自缅甸北部的一处矿山,其中的昆虫都保存着精美的金属光泽。

在显微镜下,研究团队发现,这35块琥珀化石的昆虫,包括膜翅目、鞘翅目和双翅目,至少有7个科,其中绝大部分标本属于膜翅目青蜂科,少部分属于鞘翅目隐翅虫科、蜡斑甲科,以及双翅目的水虻科。

“我们用50纳米的刀,对其中的两块琥珀做了几微米的超薄切片,又用扫描电子显微镜和透射电子显微镜分析发现,一种青蜂科昆虫胸部表面的蓝绿色是由多层重复出现的纳米级构造组成,即多层反射膜。”蔡晨阳说,在显微镜下,他们发现一只青蜂体表有6层反射膜,每一

层的厚度约为100纳米。

“根据每层膜的厚度和折射率等参数可以计算出,这6层膜的反射波长在514纳米左右,也就是绿色,这与我们在显微镜下肉眼看到的化石青蜂的绿色是接近的。而在另一块切片琥珀中的青蜂,体表是没有金属光泽的黑色,我们在显微镜下发现,这只青蜂的多层反射膜出现了褶皱,也就是结构被破坏了,这证实了多层反射膜是产生结构色的直接原因,且昆虫体表的颜色可能就是原始颜色,但也不排除颜色发生微小变化。”蔡晨阳说。

这批琥珀中,大部分昆虫的全身或是部分身体结构呈现出强烈的具金属光泽的绿色、蓝色、蓝绿色、黄绿色或蓝紫色。通过与古生、现生物种的对比研究,研究团队发现这些化石昆虫对应的现生属种同样有类似的带有金属光泽的颜色。这一发现直接证明了中生代昆虫的亮眼结构色是可以保存下来的。

“这次发现直接证明了多层反射膜可在长期地质历史中稳定保存,否定了前人关于昆虫金属色不能在中生代化石中保存的观点,并对认识早期昆虫结构色生态功能的演化具有重要意义。”蔡晨阳说。

### 古老昆虫颜色形成机制还需探究

值得一提的是,这批缅甸琥珀昆虫中看似能永久保存的彩色金属结构色并不是保持不变的。蔡晨阳说,若琥珀昆虫在切割、打磨和抛光等前期准备过程中,任一小部分结构受到损坏,使其与空气或水分接触,其颜色便会在短期内变成单一的银色,但金属光泽仍可保存,而这种变化是不可逆的。这一发现为揭示缅甸琥珀乃至其他琥珀中的银色昆虫的形成原因、对早期昆虫特征的认定和描述均具有重要的参考价值。

“不过,现代有一种金龟子,体表也呈现为银色,但它的多层反射膜是由内而外逐渐变厚的,这与我们的此次研究昆虫变成银色的形成机制不同,这两种机制各是由什么造成的,多层反射膜的厚度和折射率会不会随着年代而变化,还需要继续探究。”蔡晨阳说,琥珀昆虫的结

构色具有重要的生态意义,较为常见的绿色很可能是在茂密森林环境中的一种隐蔽色,能帮助昆虫隐匿自身从而躲避捕食者。另外,结构色参与昆虫热调节的可能性也不能完全被排除。因此不同色彩的结构色出现在不同种类的昆虫中,在一定程度上暗示了白垩纪中期森林中已经存在复杂的生态关系。

蔡晨阳说,未来,他们还将关注更古老的昆虫化石,去了解它们的体表是否已经进化出结构色,例如侏罗纪甲虫是否也有多层反射膜,为发现、重建更古老昆虫的颜色提供原始依据。

在他看来,发现并运用结构色,对于当下的生活也有借鉴意义,“例如3D打印就可以参照结构色的结构打印,而不使用使用颜料,以节省资源、减少对环境的污染。”

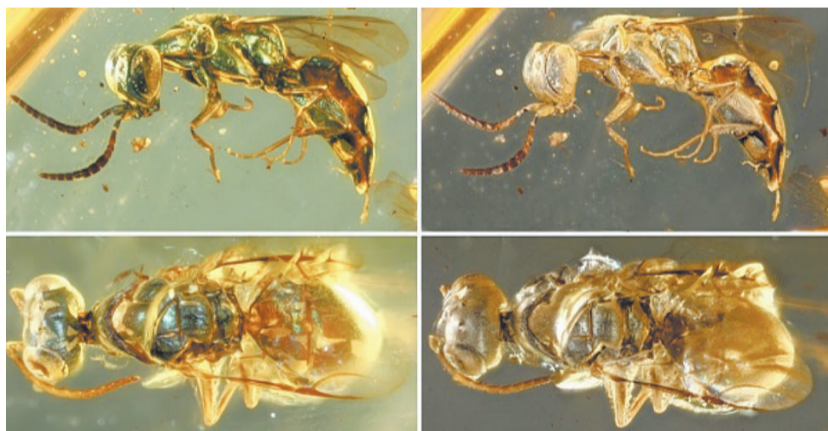
### 古生物的颜色在化石中难觅踪迹

自然界中的颜色主要有三个来源,即生物发光、色素色和结构色。结构色是光照射在虫体表面的微观结构上产生折射、衍射及干涉而形成的,是自然界中色彩最为纯净且最强烈的颜色。

由于化石保存等因素的局限,对古生物的颜色复原一直是项很复杂的工作。

此次研究的第一作者与通讯作者、中科院南古所副研究员蔡晨阳告诉科技日报记者,动物结构色也有多种来源,最普遍的是动物体表的多层反射膜,常见于金龟、苍蝇、吉丁虫;还有的是来自衍射光栅,常见于孔雀羽毛、蓝闪蝶;光子晶体是比较少见的一种,例如呈现欧宝色的象甲。

“化石中的结构色,可以为生物间的视觉交流和颜色的功能演化等重要提供重要证据。此前,有学者曾在距今约5000万年前的始新世的印痕化石里,发现过与颜色相关的昆虫的纳米结构。但是,上溯到一亿年前的昆虫,是否已经演化出结构色一直成谜,此前我们也没有在这个时期的化石中发现过颜色鲜艳的昆虫,而在此



青蜂化石身体表面结构色变化前后的对比图 受访者供图

## 从非洲到东亚 早期现代人“东迁”可能走过“北方路线”

本报记者 陆成宽

早期现代人是怎样走出非洲来到东亚的?他们到底走了哪条路线?这个问题一直被学术界高度关注。

以往学术界更倾向于认为,早期现代人从非洲向东亚进发,走了一条“南方路线”,这条路线途经阿拉伯半岛、印度、东南亚等地。为探究这条早期现代人扩散的路线,研究人员发表了大量关于“南方扩散路线”的论文。

事实上,早期现代人“东迁”,还有一条“北方路线”,这条路线途经中亚、西伯利亚、蒙古和中国西北等地。然而,这条路线很长一段时间都没有学者关注,相关研究也显得冷清。

### 在不同时段有着不同的扩散路线

近年来,随着古DNA分析技术的发展,新的测年技术的应用、考古新材料的发现,时移世易,早期现代人“东迁”的“北方路线”开始受到关注,越来越多的学者将目光汇聚于此。

近日,应《科学通报》的邀请,中国科学院古脊

椎动物与古人类研究所高星团队发表了关于早期现代人沿着“北方路线”扩散的评述。“化石人类学、古基因组学、考古学等多方面证据表明,距今约5万—3万年前,早期现代人曾沿中亚、西伯利亚、蒙古、中国西北地区等向东扩散。”高星说。

相比早期现代人在距今约12万—8万年前便沿着“南方路线”向东扩散,“北方路线”要晚不少。高星说,这表明,早期现代人的扩散是一个复杂过程,在不同时段有着不同的扩散路线,并且扩散的机制和动因可能有所不同。

早期现代人在沿“北方路线”扩散过程中与古老类型人类(尼安德特人、丹尼索瓦人等)有过频繁的基因交流,揭示出古人类基因交流历史的复杂性。“北方路线”的最新研究成果表明,早期现代人的扩散是一个复杂的动态过程,且扩散过程中与不同人群的基因交流可能是常态,提醒学者在讨论我们的直接祖先——现代人的起源和演化时,应该更加重视区域复杂性和基因交流的频发性。

### 石制品遗存为研究早期现代人扩散提供了依据

石制品技术是论证早期现代人扩散路线的

重要证据。因与早期现代人出现的时间重叠,出土的文化遗物(如装饰品)具有行为现代性特征等原因,研究者通常认为旧石器时代晚期初段(IUP)的文化遗存与早期现代人相关。

以往的研究立足东北亚不同区域石制品技术的笼统对比,提出了此类技术的扩散路线,但缺乏以人类行为决策为基础的详细技术对比。针对此情况,高星团队等选择宁夏水洞沟遗址第1地点的石制品开展了详细的技术分析。宁夏水洞沟遗址群是中国旧石器时代晚期的重要遗址群,在石制品技术的扩散、晚更新世晚期东亚人群互动和生态适应等研究方面发挥着重要作用。其中,第1地点因出土了具有欧亚大陆西方旧石器时代中晚期过渡特点的石制品遗存,为讨论早期现代人的扩散提供了重要依据。

水洞沟遗址第1地点1963年出土石制品的技术研究,将古人类的技术实践看作为决策过程,通过对石核准备、台面修理、剥片面维护、剥片与石器加工等不同石制品生产阶段行为决策的分解与提取,重建古人类的技术知识体系。

研究人员通过与俄罗斯西伯利亚阿尔泰山地区、外贝加尔地区、蒙古北部地区相关 IUP 遗址

石制品技术的对比,发现不同地区存在一定的区域技术特点,但总体上水洞沟第1地点的石制品技术与西伯利亚阿尔泰山地区更为接近;相较而言,其与蒙古北部和外贝加尔地区差别较大。目前已有的年代学研究结果显示,此类遗存在西伯利亚阿尔泰山地区出现的时间较早,在蒙古北部、外贝加尔地区和中国北方出现的时间大体相近,但晚于阿尔泰山地区。

综合以上证据,高星团队提出东北亚地区 IUP 石制品技术的扩散是多路线模式,而非之前学者提出的单线扩散模式,表明了早期现代人扩散的复杂性。该项成果已于近日在《公共科学图书馆·综合》上发表。

高星表示,现代人扩散的“北方路线”的相关研究也存在一些薄弱环节,给研究者提出了诸多新的课题。目前中亚、中国西北地区等地发现的相关考古遗址还较少,亟需系统的调查以填补“北方路线”上的空白;目前所发现的早期现代人化石和古DNA的研究案例较少,基础数据有待补充;“北方路线”所在的区域地理环境多样(林地、草原、沙漠等),早期现代人扩散过程中对不同生态环境的适应,也将会成为今后相关研究的重点。

### 新解

## 远古鱼类是怎样演化成四足动物的? 它的鼻孔内藏着进化的秘密

卢静

今年春天,澳大利亚和加拿大科学家组成的团队在《自然》杂志公布的一件精美的泥盆纪鱼类化石轰动了古生物界。在苦苦寻找了数十年后,这件希望螈的完整化石,终于为我们揭开了手指起源的关键一环。

在许多人的认识中,水中的鱼和陆地上多姿多彩的鸟兽爬虫有着巨大的差异。19世纪初,法国生物学家艾蒂安·若弗鲁瓦·圣伊莱最早注意到生活在尼罗河中的一种鱼,与人类以及其他陆地动物的身体结构拥有一系列共同点。不久之后,达尔文提出的进化论对此作出了解释:现代鱼类和现代四足动物拥有共同的祖先——古代鱼类。通俗来说,可以理解为“鱼类登陆演化成四足动物,人是从鱼演化来的”。在接下来的近200年内,要解决的问题就变成了:什么鱼、在何时、怎样演化成了四足动物?

### 谁是四足动物直接祖先的有力竞争者

一些现代鱼类也生活在水陆相交的地带,比如弹涂鱼、攀鲈等,它们不仅能呼吸空气,还能在陆地上生存很长时间。但这些鱼和其他绝大多数现生鱼类一样,都属于辐鳍鱼类,和四足动物没有直接演化关系。演化成四足动物的鱼属于肉鳍鱼类,早在4亿多年前,它们和辐鳍鱼类就已经分道扬镳。

现存的、四足动物以外的肉鳍鱼类只有两个类群:空棘鱼和肺鱼。但是化石显示,史前的肉鳍鱼类曾经极为繁盛。那么在众多的肉鳍鱼类中,到底哪一支是我们的祖先呢?这是一个很复杂的问题。为了找到答案,我们需要追溯到四足动物登陆这一关键节点。

大多数演化事件都会经历漫长的铺垫,然后在较短时间内发生飞跃,四足动物的起源同样如此。中国华南地区可能是研究志留纪和泥盆纪早期鱼类的最佳地点。在4.2亿年前,云南曲靖郊外的丘陵曾经是一片浅海,这里的“鱼类时代”比世界其他任何地方开始得更早。我国科学家在曲靖的志留纪地层中发现的梦幻鬼鱼,可能是目前已最古老的肉鳍鱼。

从梦幻鬼鱼开始,肉鳍鱼类踏上了演化的漫漫征途。早泥盆世早期(约4.2亿—4.1亿年前)是肉鳍鱼类演化的爆发阶段,在这一时期,肉鳍鱼类一下子开枝散叶,分成几大分支,分别沿着不同的道路演化。

首先分化出去的是空棘鱼类,它们在很多方面和肉鳍鱼类的原始形态相差不远。空棘鱼类拥有肺和肌肉发达的偶鳍,然而在演化历史上,它们似乎从来没有对陆地和水陆之交的地带产生过兴趣——所有空棘鱼类都是典型的水生动物。因此,它们失去了成为四足动物祖先的“资格”。

另一支现存的肉鳍鱼类——肺鱼,曾经是四足动物直接祖先的有力竞争者。它们长得很像两栖动物,有内鼻孔和发达的肺,可以离开水体生存很久。在亲缘关系上,现代肺鱼也是现存最接近四足动物的鱼类。但是,对化石的进一步研究否定了肺鱼类是四足动物直接祖先的想法。我国著名古生物学家张弥曼先生发现,肺鱼的原始类型杨氏鱼没有内鼻孔,这是证明肺鱼并非我们祖先的决定性证据。

### 鱼类内鼻孔演化能提供重要证据

那么,我们真正的祖先是什么呢?在排除掉一系列错误选项后,学者发现有一大类肉鳍鱼比空棘鱼和肺鱼都更加接近四足动物,并将其称为“四足形类肉鳍鱼”。目前最古老的四足形类肉鳍鱼发现于中国,名为奇东生鱼。奇东生鱼的头只有指甲盖那么大,作为最原始的四足形类肉鳍鱼,奇东生鱼完全是鱼的模样,显然还生活在水中。

在用高精度CT扫描奇东生鱼的脑颅之后,研究人员吃惊地发现,它的脑中竟然已经有了适应陆地生活的结构。它的垂体有一对与现生两栖动物的垂体前端相似的结构,被称为“腺垂体结构部”。在陆生动物中,这个结构接受昼夜光线信息输入,分泌激素控制昼夜节律。这一发现说明,奇东生鱼可能生活在光照变化明显的浅水中,它们适应浅水生活环境的许多特点,为四足形类肉鳍鱼最终登上陆地铺平了道路。

在我国华南,和奇东生鱼差不多生活在同一时代的四足形类肉鳍鱼还有肯氏鱼。肯氏鱼化石研究最重要的意义是显示了内鼻孔演化的中间状态。人类的鼻子是呼吸器官,但实际上在大多数鱼类中,两对鼻孔全部位于头部外表面,鼻子只是嗅觉器官,与呼吸没有关系。鼻子从嗅觉器官演化为四足动物呼吸道的第一步,是演化出鼻腔在口腔中的开口,也就是内鼻孔。内鼻孔是怎样进入口腔的,过去一直不太清楚。中国科学院古脊椎动物与古人类研究所朱敏研究员发现,肯氏鱼的后面一对鼻孔正好处于口腔内外的交界处。就这样,化石记录完美地保存下了内鼻孔演化的过渡状态。

在奇东生鱼和肯氏鱼之后,四足形类肉鳍鱼又分化为两大分支,其中的一支演化出了三列鳍鱼类。三列鳍鱼类和希望螈类可能有很近的亲缘关系,三列鳍鱼类—希望螈类—四足动物的演化序列虽然还不够完美,但已经提供了足够的过渡信息。

而四足形类肉鳍鱼演化出的另一支——根齿鱼,距离登陆也曾只有一步之遥。根齿鱼的鳍十分僵硬,可能会像鳄鱼一样在浅水中慢慢接近猎物。在宁夏的晚泥盆世中宁动物群,朱敏曾经发现了一种巨大的根齿鱼类:周氏鸿鱼,它是这片水域的顶级捕猎者。奇怪的是,和过去发现的根齿鱼类不太一样,周氏鸿鱼有着一个过去只在希望螈类和四足动物中出现的、可以灵活运动的“脖子”。这说明周氏鸿鱼可以像希望螈类和最早的四足动物一样,在当时的华北大陆水陆之交的环境中自如生活,然而它们最终也没能成功登上陆地。

我国目前还没有发现希望螈类的化石,也没有发现过完整的泥盆纪四足动物。不过2004年,曾经在宁夏的晚泥盆世中宁动物群发现过一小段四足动物的下颌骨,它被命名为中国螈。随着研究的深入,也许未来我们还会在中国找到更多的早期四足动物演化证据,帮助我们揭开四足动物起源的奥秘。

来源:环球科学