

# 同步辐射 X 射线相衬显微 CT 在古生物学中的应用\*

殷宗军<sup>1</sup> 朱茂炎<sup>1,†</sup> 肖体乔<sup>2</sup>

(1 中国科学院南京地质古生物研究所 现代古生物学和地层学国家重点实验室 南京 210008)

(2 中国科学院上海应用物理研究所 上海光源 X 射线成像及生物医学应用光束线站 上海 201204)

**摘要** X 射线无损成像技术在古生物化石标本研究领域中的应用十分广泛. 近几年来, 随着技术的不断革新, 同步辐射 X 射线相衬显微断层成像技术(SRX-PC- $\mu$ CT)也被引入到这一领域. 由于同步辐射光源产生的硬 X 射线具有高亮度、高准直性和高空间相干性等优点, 可以实现化石标本高分辨率(亚微米级)的无损三维显微成像, 给古生物学的发展带来了新的机遇. 文章简要回顾了用于古生物化石标本无损成像技术的发展历程, 并在此基础上综述了同步辐射 X 射线断层显微成像技术在古生物学领域的应用现状和前景.

**关键词** 古生物学, 同步辐射 X 射线三维成像, 综述, 化石, CT

## Application of synchrotron X-ray microtomography in paleontology for nondestructive 3-D imaging of fossil specimens

YIN Zong-Jun<sup>1</sup> ZHU Mao-Yan<sup>1,†</sup> XIAO Ti-Qiao<sup>2</sup>

(1 State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 SSRF, Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

**Abstract** X-ray imaging has been employed in paleontology for more than 100 years, and has made great contributions to the nondestructive studies of paleontological fossil specimens. With the development of X-ray technology, a new type of nondestructive imaging, synchrotron X-ray microtomography, has been applied to this field in recent years. This is a special kind of micro-computer tomography based on hard X-rays from synchrotron radiation, which is characterized by high brilliance, high transverse spatial coherence and a high degree of uni-directionality. Nondestructive 3-D imaging with submicron resolution of fossils is now possible, opening up new possibilities for paleontology. This paper reviews recent developments and future prospects of the application of phase-contrast-enhanced synchrotron X-ray microtomography in paleontology.

**Keywords** paleontology, synchrotron X-ray microtomography, review, fossil, CT

### 1 引言

古生物学是研究地质历史时期生物及其演化历史的学科, 它的主要研究对象是保存在沉积岩中各式各样的化石. 化石按保存方式的不同可以分为实体化石、模铸化石、遗迹化石和分子化石四种. 其中实体化石(经石化作用保存了全部或部分生物遗体的化石)在地质历史时期形成的数量最多, 加之其保存的生物体结构信息较其他类型化石要丰富, 因

而研究价值也最大. 在研究实体化石的过程中, 化石标本成像是不可或缺的研究手段之一. 随着古生物学研究的不断深入, 人们对实体化石标本的成像技术提出了越来越高的要求. 无损成像作为最理想的成像方式颇受古生物学家的关注. 目前在该领域中最受青睐的成像手段是同步辐射硬 X 射线断层显

\* 国家自然科学基金(批准号:40725005)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2006CB806401)资助项目

2009-04-07 收到

† 通讯联系人. Email: myzhu@nigpas.ac.cn

微成像技术. 这一技术的出现给古生物学的发展带来了新的增长点, 为研究化石, 尤其是小型和微体化石的三维结构和超微构造提供了无与伦比的手段<sup>[1-3]</sup>.

## 2 化石标本无损成像的重要性

化石标本成像是研究化石过程中使用最为普遍的一种手段. 无论是研究可用肉眼观察的大化石还是肉眼难以分辨的微体化石, 获取清晰的化石图像是描述化石之前必不可少的操作. 由于实体化石标本的多样性(按化石尺寸大小可分为大化石和微体化石, 按保存类型的不同可分为骨骼化石和矿化软躯体化石)和研究目标的差异, 古生物学家往往要采用多种成像方法. 目前, 传统的成像方法主要有三种: 普通光学数码照相技术、扫描电子显微镜成像技术和透射电子显微镜成像技术. 其中普通光学数码照相还可以借助实体显微镜或透射光学显微镜采集化石标本的微观结构图像, 即通常人们所说的“反射光学显微数码照相”和“透射光学显微数码照相”.

以上三种成像方法能满足多数情况下各种化石的成像需求. 但它们一般只能采集化石标本的外观图像(除非化石标本本身是残破的), 在揭示完好保存的化石标本内部结构信息方面则有很大的局限性. 而化石内部结构信息往往是解决化石分类问题的关键所在, 比如珊瑚、菊石(一种生活在海洋中类似于鹦鹉螺的头足类, 已于 6500 万年前与恐龙一道灭绝)等无脊椎动物骨骼化石, 了解其内部结构是鉴定它们分类位置的前提.

用传统方法研究化石内部结构, 则需要通过切片的方式将标本制作成薄片. 由于化石标本的稀缺性, 很多精美的化石被切片后不仅失去了全貌, 而且无法再使用其他方法进行进一步的研究. 尤其是对于微体化石, 切片过程中会磨损很多重要的标本, 而且重要化石切面的获得具有很大的偶然性. 加上从单一切面恢复生物体的立体形态存在相当大的误差, 导致化石的描述和诠释充满了多解性和不确定性.

随着古生物学研究的发展, 化石无损成像技术, 即能在不破坏化石标本的前提下, 全方位解析化石的三维立体结构, 尤其是化石的内部结构(内部结构往往是解决疑难化石分类位置的关键)的技术, 已成为古生物学家迫切需要的研究手段. 无损成像技术不仅在解读化石标本内部结构信息方面游刃有余<sup>[2,4,5]</sup>, 而且还能帮助研究人员有效地规避化石

在修理过程中被破坏的风险<sup>[5]</sup>. 众所周知, 化石通常都埋藏在沉积岩当中. 对于包埋在围岩中的大化石, 一般需要借助器械通过人工修理来揭露化石结构, 比如用电动、气动或人工钻头修理保存在火山凝灰岩中未出露的恐龙骨骼化石, 用小刻刀修理页岩中出露不完全的三叶虫化石等等. 对于微体化石, 由于肉眼难以分辨, 则往往使用化学方法来分离围岩和化石. 化学分离法一般是采用酸处理的方式溶蚀化石围岩(要求化石和围岩成分不同), 然后再借助体视显微镜对岩石不溶残渣进行人工筛选, 挑选出没有被酸侵蚀的化石标本. 但无论是人工修理还是化学分离, 都不可避免地会对化石造成不同程度的破坏. 对于古生物学研究来说, 珍稀标本被破坏后的损失是不可估量的, 而无损成像技术使得规避标本被破坏的风险成为可能<sup>[6]</sup>.

特别重要的是, 无损成像技术因 X 射线的强穿透性, 不仅能够发现没有暴露的化石标本和结构<sup>[5]</sup>(图 1), 而且对一些肉眼和普通光不能辨别的化石形态和结构(各种矿化了的生物软躯体和器官等)进行高吸收衬度成像, 从而受到古生物学家的重视.

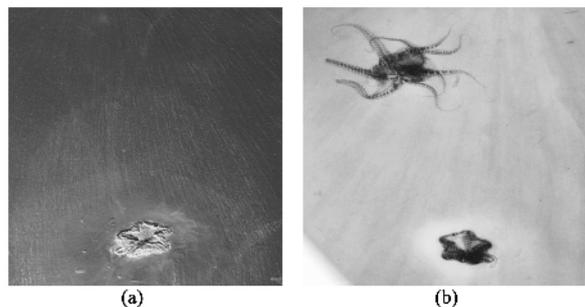


图 1 使用 X 射线无损成像技术寻找岩石中未出露的化石标本(引自文献[5])(a)为已部分修理的板岩外观普通光学照片, 只能观察到一个海星化石标本(b)为 X 射线照射过后的板岩照片, 除能观察到图(a)中的海星化石外, 还发现了埋藏在板岩内部两个叠覆在一起的大型海星化石

化石标本无损成像技术的诞生不仅是古生物学领域的一场技术革新, 更为学科的发展带来了新的生机. 通过无损成像技术的再研究, 一些使用传统手段无法鉴定的疑难化石的分类位置将被重新厘定. 基于传统研究方法获得的化石信息而得出的生物分类和系统演化结论, 也将随着这项技术的发展而被重新审视和评估.

## 3 化石标本无损成像技术的发展

早在 1896 年(即 X 射线被发现的第二年), 德

国古生物学家就曾用刚发明不久的普通医用 X 光机对泥盆纪早期(4.16—3.97 亿年前)洪斯吕克板岩化石群(Hunsrück Slate fossils)的某些动物化石进行了无损成像研究,这是无损成像技术应用于古生物学领域的最早记录<sup>[5]</sup>。早期的 X 射线无损成像技术所获得的图像分辨率并不高,故未得到普遍推广,但在寻找和辅助修理精美化石标本以及对保存在页岩或板岩中重要化石标本的无损成像等方面仍然做出了重要贡献。上世纪 30 年代以来,随着普通 X 光机成像分辨率的逐渐提高,该技术才被普遍应用。直到今天,这种成像技术仍然还在化石研究中发挥着重要作用<sup>[7]</sup>。

虽然 X 光机能在不损坏化石标本的同时获得较为清晰的化石图像,但这一方法的应用仍然受到各种限制。首先,该方法只对矿化的标本(比如黄铁矿矿化)有比较满意的成像效果。因为常规 X 射线成像是以吸收衬度和几何光学为基础的一种无损成像方法,一般矿化的标本因富含重金属元素,对 X 射线的吸收较其围岩(含石英、长石或方解石等透明矿物居多)要高,故能获得衬度较好的高分辨图像。但对于富含轻元素或者内部密度差别较小的标本成像效果并不理想。其次,该技术受到化石标本厚度的限制。化石或者岩石标本过厚,普通 X 射线难以穿透,无法获得清晰的图像。第三,X 射线照相(radiography)采集的是化石标本的二维图像,缺乏空间层次感,不利于生物体三维立体结构的复原。这也是该方法最大的缺陷。也正是因为这一缺陷,古生物学家不得不找寻更好的无损研究技术,以解决化石标本三维重建问题。

传统手段对化石标本三维结构重建是通过连续切片(serial slicing)或称连续磨片(serial grinding)的方式,借助普通光学数码照相和计算机图像重构软件来实现的<sup>[8]</sup>。长期以来,这种方法因具有操作简单,对设备要求不高,而且在研究大化石方面有较好效果等优点而被广泛应用<sup>[9-15]</sup>。但随着微体古生物学研究的不断深入和化石超微结构研究需求的增长,这种方法的局限性也越来越明显。一方面,连续切(磨)片的方法实际上得到的是一个“虚拟化石”,获得了化石的三维结构图像,但标本本身却被切成了薄片或被磨成了粉末,因此不满足“无损研究”这一标准;另一方面,这种方法的精度难以提高。连续切片的切面间距很难控制在 1mm 以下,连续磨片的截面间距最小也只能达到 10 $\mu\text{m}$  的级别<sup>[8,9,13]</sup>,而且普通光学数码照相技术的空间分辨率不能满足对化

石超微结构的研究要求,故只能以大化石为研究对象,对微体化石无法操作<sup>[8]</sup>。

X 射线断层成像技术(X-ray computed tomography, CT)的出现,弥补了传统方法和 X 射线放射成像在化石三维结构研究方面的不足。这一无损成像技术自出现以来,由于其广泛的应用潜力,得到快速发展。目前,按照空间分辨率和适合观察的标本尺度的不同,CT 技术可一般性地归为四大类<sup>[4]</sup>(见表 1)。

表 1 CT 技术的种类(引自文献[4])

| CT 类型                               | 可观察标本的尺寸 | 分辨率                |
|-------------------------------------|----------|--------------------|
| 常规 CT (conventional CT)             | 米级       | 1000 $\mu\text{m}$ |
| 高分辨率 CT (high-resolution CT)        | 分米级      | 100 $\mu\text{m}$  |
| 超高分辨率 CT (ultra-high-resolution CT) | 厘米级      | 10 $\mu\text{m}$   |
| 显微 CT (computed micro-tomography)   | 毫米级      | 1 $\mu\text{m}$    |

目前市场上的医用 CT 多数是常规 CT,其空间分辨率远远无法满足化石(尤其是微体化石)图像三维重建的需求。工业 CT 的种类齐全,分辨率覆盖范围较广,从毫米级别的常规 CT 到微米级别的  $\mu\text{CT}$  都有<sup>[4]</sup>。由美国国家自然科学基金资助的德克萨斯大学奥斯汀分校“高精度 X 射线 CT 实验室”配置的“Xradia MicroCT scanner”的分辨率甚至能达到亚微米级别<sup>[16]</sup>。由于对体积较大的化石(如大型动物头骨化石等)进行三维图像重建时,不需要过高的空间分辨率,且吸收衬度成像也能获得效果满意图像,因此高分辨率和超高分辨率的工业 CT 基本上能满足大化石无损三维成像研究的需求<sup>[6,17-20]</sup>。但对于微体化石,工业 CT 往往难以获得有意义的化石内部结构图像。工业 CT 的最高空间分辨率虽然能达到亚微米级,但它的成像基础是吸收衬度成像,只有在化石内部密度差比较大的情况下才能获得较高的成像衬度,如黄铁矿化的化石。然而,微体化石在石化作用过程中,除少量以有机质形式保存外,通常被某一种矿物质(如硅质、钙质、磷酸盐物质等)完全置换,使得化石内部密度差不大。因此,在工业 CT 上难以获得满意的成像衬度,导致化石图像反差过小,内部结构难以辨析,无法满足微体化石的高分辨率三维成像的要求。同步辐射 X 射线相位衬度显微断层成像技术(SRX-PC- $\mu\text{CT}$ )的出现才完满地解决了微体化石的无损高分辨率三维显微成像问题。

同步辐射是高能带电粒子(特别是高能电子)在磁场中沿弧形轨道做回旋运动时沿切线方向放出的电磁辐射,它覆盖了从远红外到硬 X 射线范围的

宽广波段. 通过特殊的光路系统可将同步辐射光中的硬 X 射线提取出来, 应用于各种研究, 化石标本的三维无损成像就是其中之一. 同步辐射的发展经历了三代, 即第一代的兼容环, 如我国的北京同步辐射光源; 第二代的专用环, 如我国的合肥同步辐射光源; 目前已发展到第三代, 它是大量使用插入件技术的低发射度光源, 亮度比前两代光源有了大幅度的提高. 国内刚刚建成并投入使用的上海光源属于高性能的第三代同步辐射光源, 能量居世界第四. 由于发射度低, 它的高亮度 X 射线辐射已具备较好的空间相干性, 在相位衬度成像方面具有较大的优势.

利用同步辐射 X 射线成像具有以下三方面的优点: 第一, 同步辐射光源产生的 X 射线亮度远远优于常规 X 光机, 因此在使用同步辐射 X 射线进行化石标本成像时可以将 X 射线单色化, 避免了使用 X 光机成像时化石标本对多色 X 光差异吸收后产生的硬化伪像 (hardening artefact)<sup>[1, 2]</sup>. 与此同时, 同步辐射 X 射线有高度准直的特性, 不会造成用普通 X 光成像时产生的几何伪像 (geometrical artefact)<sup>[1]</sup>. 第二, 同步辐射 X 射线具有的高束流强度 (high beam intensity) 不仅保证了无损成像时的高空间分辨率, 而且能大量缩短成像时间, 提高成像效率<sup>[2]</sup>. 第三, 低发射度同步辐射 X 射线是准相干光, 使得相位衬度断层成像 (phase contrast tomography) 成为可能. 相位衬度成像是 20 世纪 90 年代才发展起来的一种新的成像方式, 它通过记录 X 光穿透标本后的相位变化来反映标本内部电子密度分布情况, 从而得到标本内部结构的信息. 这种成像方式在一定条件下可以极大地提高成像衬度, 改变 X 射线发现百余年来吸收衬度成像一统天下的格局, 解决了微体化石等低吸收衬度标本的高分辨率图像三维重建难题<sup>[2, 21]</sup>.

目前, 同步辐射 X 射线相衬显微断层成像技术 (SRX-PC- $\mu$ CT) 是公认的可用于化石无损三维显微成像研究的最佳方法. 它的空间分辨率可以达到亚微米级, 断层扫描的虚拟切面间隔可小至不到  $1\mu\text{m}$ , 借助相关计算机图像三维重构软件, 可以获得解析度极高的化石图像, 而且实现了化石内部结构的三维可视化.

## 4 SRX-PC- $\mu$ CT 在古生物学中的应用

SRX-PC- $\mu$ CT 应用于化石无损成像研究虽然只有 10 年左右的时间, 但成果斐然. 在古无脊椎动物

学 (如不透明琥珀中的昆虫和早期动物胚胎化石等)、古脊椎动物学 (如头骨、羽毛和牙齿化石等) 和古植物学 (如植物生殖器官和种子化石) 等研究领域都取得了突破性进展.

### 4.1 SRX-PC- $\mu$ CT 与琥珀化石研究

以内含物的形式保存在地质历史时期琥珀中的生物是一种特异埋藏的实体化石. 这些琥珀化石多样性极高, 有大量的昆虫、蜘蛛等无脊椎动物和高等植物的球果、花粉等. 由于包裹在琥珀中的生物体遭受成岩作用破坏的程度较少, 因而保存了比普通实体化石更为丰富的生物结构信息, 为演化古生物学和古生态学研究提供了不可多得的珍贵化石材料. 研究琥珀化石的传统方法多是使用光学显微镜, 或切片后用扫描电镜观察. 这不仅破坏了珍贵的化石标本, 还难以用于研究不透明的琥珀标本 (地质历史时期产生的琥珀中有相当数量是完全不透明的, 即使被抛光后也无法使用光学显微镜进行观察<sup>[21]</sup>). 近年来, SRX-PC- $\mu$ CT 成为古生物学家研究琥珀化石, 尤其是不透明琥珀的首选<sup>[2, 22-25]</sup>, 而且已探索出能快速地从大量不透明琥珀标本中找寻化石并进行三维显微成像的方法, 大大提高了琥珀化石无损三维成像的效率<sup>[22]</sup>.

琥珀作为化石特异埋藏条件之一, 除了能保证化石标本的完整性外, 更为重要的是它可以特异保存很多难以通过普通成岩作用埋藏成为化石的生物结构, 比如鸟类的羽毛化石. 羽毛化石是研究鸟类起源和飞行起源的必不可少的化石材料. 长期以来, 羽毛实体化石标本极其缺乏 (岩石中的羽毛化石都是印痕化石, 没有保存羽毛的立体结构, 细节信息也只有少量残留, 甚至没有), 因此琥珀中三维保存的羽毛化石标本的稀缺性使得同步辐射 X 射线无损三维成像技术成为科学家们的不二之选. 2008 年, Perichot 等人使用 SRX-PC- $\mu$ CT 等技术研究了来自法国西部的白垩早期 (约距今 1 亿年) 琥珀中的羽毛化石, 这些标本填补了鸟类羽毛演化历史的一个关键的中间环节, 其研究结果完善了关于羽毛演化过程的理论<sup>[25]</sup>, 是该领域一个令人振奋的研究成果.

### 4.2 SRX-PC- $\mu$ CT 与早期动物胚胎化石研究

除琥珀外, 通过矿化作用 (如黄铁矿化、硅化、磷酸盐化等) 三维立体保存的非骨骼化石也属于特异埋藏的化石. 中国贵州 5.8 亿年前的瓮安生物群就是一个典型. 它主要由三维立体保存的磷酸盐化

微体化石组成。自 1998 年 2 月“Nature”和“Science”杂志上同时报道了瓮安生物群中动物胚胎化石的发现以来<sup>[26-27]</sup>,瓮安生物群就成为国际早期生命研究领域的一大前沿热点,并产生了一门新的交叉学科——化石胚胎学。化石胚胎学的兴起对胚胎化石内部结构的三维图像重建提出了要求,因此在动物胚胎化石发现的第二年,就有专家尝试将 SRX-PC- $\mu$ CT 技术引入到这一领域(陈均远,私人通信)。2006 年夏,陈均远等人首次采用该技术证实了具极叶构造的螺旋动物胚胎化石在瓮安生物群中的存在,表明两侧对称动物在 5.8 亿年前就已经出现<sup>[28]</sup>,这一成果将后生动物的起源时间向前推进了近 5 千万年。同年秋,Donoghue 等和 Hagadorn 等分别使用同步辐射和工业 X 射线  $\mu$ CT 技术,第一次成功地实现了动物胚胎化石的三维图像重建<sup>[3,29]</sup>,为 SRX-PC- $\mu$ CT 在化石胚胎学领域的推广起到了重要的示范作用。

#### 4.3 SRX-PC- $\mu$ CT 与古人类学研究

长久以来牙齿化石一直是用于鉴定脊椎动物系统分类和探索其演化进程的极佳材料。尤其是在头骨等骨骼化石十分缺乏的古人类学研究领域,牙齿化石为探索古人类与类人猿之间的演化关系以及现代人种起源的历程做出了重要贡献<sup>[30-34]</sup>。

为了提取牙齿化石三维结构和超微构造中隐藏的生物学信息,如动物系统发生、个体生长发育、年龄、食性、齿系过程(dentition process)、机械适应性等,传统的研究手段只能使用切片法切开牙齿标本,然后借助扫描电子显微镜进行观察。这种方法的缺陷有三:首先,不满足无损研究的要求;其次,单从一张或若干张切片中所能了解的信息有限;第三,无法实现牙齿化石的三维图像重建。传统方法的局限性使得 X 射线  $\mu$ CT 技术在该领域中快速普及<sup>[18,35-38]</sup>,其中 SRX-PC- $\mu$ CT 因高空间分辨率和高成像衬度已经成为古人类学家研究牙齿化石的首选<sup>[1,2,30]</sup>。值得一提的是,SRX-PC- $\mu$ CT 在实现高分辨率三维图像重建的同时,还能轻松地测量齿冠厚度和体积,极大地拓展了人们从有限的标本中提取更多生物信息的能力。

#### 4.4 SRX-PC- $\mu$ CT 与古植物学研究

在古植物研究领域,SRX-PC- $\mu$ CT 也得到了广泛应用。除了对普通微体植物化石(如轮藻化石等)进行系统分类学的厘定研究外<sup>[39]</sup>,该方法在疑难植

物化石研究中发挥了重要作用。2007 年,Friis 等人研究了来自葡萄牙和南美洲早白垩纪一些裸子植物的种子化石。这些种子化石由于经受过自然野火的作用,不仅以三维立体的方式保存下来,而且还保存了细胞级结构细节。但由于这些种子化石个体通常只有几个微米大小,长期以来囿于传统成像手段限制而遭到人们忽视。Friis 等人使用 SRX-PC- $\mu$ CT 技术重建了这些化石的三维结构图像,发现这些微体化石是买麻藤类和苏铁类的种子。化石的细微构造的比较研究还说明,买麻藤和苏铁是由同一个分类群分支演化而来。这一结论为学术界解开“达尔文讨厌之谜”(即被子植物起源假之谜)和完善种子植物(包括裸子植物和被子植物)系统关系提供了重要证据<sup>[40]</sup>。

### 5 SRX-PC- $\mu$ CT 在我国古生物学研究中的应用前景

近 30 年来,中国各地大量珍贵化石的发现和研究,修正和改写了一些重要生物类群的起源和演化过程,中国也逐步成为国际古生物学领域的研究大国,对完善生命进化历史做出了卓越的贡献<sup>[41]</sup>。其中我国云南澄江动物群和贵州瓮安生物群成为全球动物起源和寒武纪大爆发研究领域的焦点。十余年来,两大化石群的研究取得了许多令人瞩目的成果。澄江动物群特异保存了大量的动物软躯体化石,证实了包括脊椎动物在内的各种动物造型在寒武纪初期(5.3 亿年前)就已经快速出现,它的发现和研极大冲击了学术界关于地史时期生命演化速率和进化机制的传统认识。瓮安生物群则以大量磷酸盐化的动物卵和胚胎化石为特征。目前世界上最古老的两侧对称的动物小春虫化石<sup>[42]</sup>和具极叶构造的螺旋动物胚胎化石<sup>[28]</sup>在瓮安生物群中的发现,证实了包括三胚层两侧对称动物在内的后生动物早在寒武纪之前的 5.8 亿年前就已经出现的事实<sup>[41-43]</sup>。瓮安生物群也因此以“迄今最古老的后生动物化石群”的身份,越来越受到全球古生物界的关注。

由于传统化石标本成像手段的局限性,两大化石群中仍有许多难题尚未解决。比如澄江动物群中软躯体化石的立体形态复原和疑难化石分类问题,瓮安生物群中大量动物卵和胚胎化石的三维结构的重建以及卵裂方式的鉴定等问题。这些难题因直接关系到演化生物学领域有关动物起源和早期演化过

程中一系列重大科学谜题,故一直是学术界关注的前沿.目前看来,同步辐射 X 射线显微断层成像技术是解决这些难题的关键<sup>[1-3, 28, 44, 45]</sup>.

2008 年底,我国第三代同步辐射光源——上海光源(SSRF)建成调试期间,笔者在 SSRF BL13W1 线站曾尝试性地使用 SRX-PC- $\mu$ CT 技术,重建了少量瓮安生物群动物胚胎化石的三维结构图像,如图 2. 图 2 是一颗后生动物卵裂胚胎化石,其中(a)是将胚胎化石立体图像做透明化处理后的效果图,显示化石是由 4 个卵裂球按四面体构型排列而成,表明该化石是一颗处于四细胞卵裂期的旋转卵裂胚胎<sup>[46]</sup>.除卵裂沟外,图中还能清晰地分辨出每个卵裂球(细胞)中的细胞核.(b)和(c)是化石外观实体图像,其中(c)是将(b)中的位置在水平方向上向左旋转 90°后的效果图.(d)是化石的一张虚拟切面(切面在化石中的位置见图(b)),切面中也可以分辨出卵裂球、卵裂沟、细胞核等细胞级别或亚细胞级别的化石微观结构.光束线调试阶段受硬件条件的限制,化石图像的空间分辨率尚未达到亚微米级别,但图中显示的信息已经远远超过了传统手段(岩石切片或者扫描电镜)所能达到的水平.

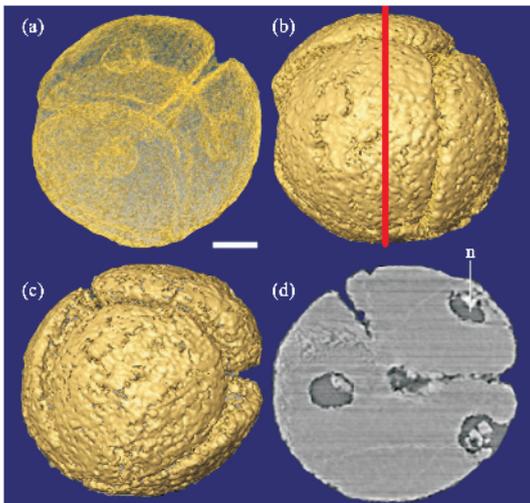


图 2 瓮安生物群动物胚胎化石(比例尺为 100 $\mu$ m, n = nucleolus 表示细胞核结构)

同步辐射 X 射线无损成像技术的优点让我们有理由相信,它的引入会揭示出传统方法无法发现的重要信息,将为早期生命研究领域带来新的突破,使学术界新一轮的“溯源之旅”<sup>[47]</sup>向源头走得更远.我国特异埋藏的早期生命化石库数量众多.磷酸盐化三维立体保存的微体化石群,除贵州瓮安外,在陕西宁强、江西朝阳、湖北宝康和湘西地区等均有产出.保存在页岩中的宏观软躯体动物群,除澄江动物

群外还有云南马龙动物群、关山动物群和贵州凯里动物群等.这些精美罕见的化石库是早期生命演化的实证记录,与瓮安生物群和澄江动物群一样,它们也有不少传统方法无法解开的谜,等待同步辐射技术的引入.

除了早期生命研究外,同步辐射技术在其他古生物学研究领域中也具有相当大的应用前景.比如被子植物起源和早期演化,鸟类的系统发生与飞行起源等在国际上享有相当声誉的领域,以及包括珊瑚、腕足、双壳等无脊椎动物化石和各种微体化石等的三维重建等领域.

综上所述,古生物学研究不断深化带来的需求增长和同步辐射 X 射线成像技术的不断成熟,使得两者的结合形成了古生物学发展中一个重要的学科增长点.随着我国上海光源的建成,同步辐射 X 射线成像技术在国内古生物化石标本无损三维成像研究方面将发挥重大作用,一批原创性重大研究成果值得期待.

## 6 结论

同步辐射光源产生的硬 X 射线具有高亮度(高通量密度)、高准直性和高空间相干性等优点,结合相位衬度成像方法,非常适用于化石(尤其是小型和微体化石)内部结构的无损高分辨率成像和三维重建.同步辐射 X 射线显微 CT 技术的出现弥补了传统化石成像手段和工业 CT 的不足,为古生物学家揭示化石和生物演化奥秘提供了一种全新的技术手段,为古生物学学科的发展带来了新的机遇.

致谢 感谢上海光源的邓彪、杜国浩、谢红兰对本文化石标本的同步辐射 X 射线显微成像提供的帮助,以及邓彪和法国 ESRF 的 Paul Tafforeau 为本文提供有关文献资料支持.

## 参考文献

- [1] Olejniczak A J, Tafforeau P, Smith T M *et al.* *American Journal of Physical Anthropology*, 2007, 133 :1
- [2] Tafforeau P, Boistel R, Boller E *et al.* *Appl. Phys. A*, 2006, 83 :195
- [3] Donoghue P C J, Bengtson S, Dong X *et al.* *Nature*, 2006, 442 :680
- [4] Ketcham R A, Carlson W D. *Computers & Geosciences*, 2001, 27 :381
- [5] Hohenstein P. *The British Journal of Radiology*, 2004, 77 :420

- [ 6 ] Balanoff A M , Norell M A , Grellet-Tinner G *et al.* *Naturwissenschaften* , 2008 , 95 : 493
- [ 7 ] Kühl G , Brigg D E G , Rust J . *Science* , 2009 , 323 : 771
- [ 8 ] Sutton M D , Briggs D E G , Siveter D J *et al.* *Nature* , 2001 , 410 : 461
- [ 9 ] Sutton M D , Briggs D E G , Siveter D J *et al.* *Palaeontologia Electronica* , 2001 , 4( 1 ) : 1
- [ 10 ] Sutton M D . *Proceedings of the Royal Society B* , 2001 , 268 : 2355
- [ 11 ] Sutton M D , Briggs D E G , Siveter D J *et al.* *Proceedings of the Royal Society B* , 2002 , 269 : 1195
- [ 12 ] Sutton M D , Briggs D E G , Siveter D J *et al.* *Palaeontology* , 2004 , 47 : 293
- [ 13 ] Sutton M D , Briggs D E G , Siveter D J *et al.* *Proceedings of the Royal Society B* , 2005 , 272 : 1001
- [ 14 ] Siveter D J , Sutton M D , Briggs D E G *et al.* *Proceedings of the Royal Society B* , 2007 , 274 : 2099
- [ 15 ] Sutton M D , Briggs D E G , Siveter D J *et al.* *Proceedings of the Royal Society B* , 2006 , 273 : 1039
- [ 16 ] Web site of UTCT : <http://www.crlab.geo.utexas.edu/xradia/index.php>
- [ 17 ] Farrell C Ú , Briggs D E G . *Proceedings of the Royal Society B* , 2007 , 274 : 499
- [ 18 ] Gantt D G , Kappleman J , Ketcham R A *et al.* *European Journal of Oral Sciences* , 2006 , 114 ( Suppl. 1 ) : 360
- [ 19 ] Rieppel O . *Zoologischer Anzeiger* , 2007 , 246 : 177
- [ 20 ] Milner A C , Walsh S A . *Zoological Journal of the Linnean Society* , 2009 , 155 : 198
- [ 21 ] Davis T J , Gao D , Guruyev T E *et al.* *Nature* , 1995 , 373 : 595
- [ 22 ] Lak M , Néraudeau D , Cloetens P *et al.* *Microscopy and Microanalysis* , 2008 , 14 : 251
- [ 23 ] Lak M , Azar D , Nel A *et al.* *Invertebrate Systematics* , 2008 , 22 : 471
- [ 24 ] Heethoff M , Helfen L , Norton R A . *Journal of Paleontology* , 2009 , 83 : 153
- [ 25 ] Perrichot V , Marion L , Néraudeau D *et al.* *Proceedings of the Royal Society B* , 2008 , 275 : 1197
- [ 26 ] Li C , Chen J , Hua Tzu-En . *Science* , 1998 , 279 : 879
- [ 27 ] Xiao S , Zhang Y , Knoll A H . *Nature* , 1998 , 391 : 553
- [ 28 ] Chen J , Bottjer D J , Davidson E H *et al.* *Science* , 2006 , 312 : 1644
- [ 29 ] Hagadorn J W , Xiao S , Donoghue P C J *et al.* *Science* , 2006 , 314 : 291
- [ 30 ] Tafforeau P , Smith T M . *Journal of Human Evolution* , 2008 , 54 : 272
- [ 31 ] Dean M C , Leakey M G , Reid D *et al.* *Nature* , 2001 , 414 : 628
- [ 32 ] Dean M C . *Proceedings of the Royal Society B* , 2006 , 273 : 2799
- [ 33 ] Moggi-Cecchi J . *Nature* , 2001 , 414 : 595
- [ 34 ] Schwartz G T , Samods K E , Godfrey L R *et al.* *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* , 2002 , 99 : 6124
- [ 35 ] Olejniczak A J , Grine F E . *South African Journal of Science* , 2005 , 101 : 219
- [ 36 ] Olejniczak AJ , Grine F E . *Anatomical Record A* , 2006 , 288 : 263
- [ 37 ] Olejniczak A J , Smith T M , Wang W *et al.* *American Journal of Physical Anthropology* , 2008 , 135 : 85
- [ 38 ] Smith T M , Olejniczak A J , Tafforeau P *et al.* *South African Journal of Science* , 2006 , 102 : 513
- [ 39 ] Feist M , Liu J , Tafforeau P . *American Journal of Botany* , 2005 , 92( 7 ) : 1152
- [ 40 ] Friis E M , Crane P R , Pedersen K R *et al.* *Nature* , 2007 , 450 : 549
- [ 41 ] Gould S J . *The book of life* . New York : W. W. Norton & Company , 2002 . 1—256
- [ 42 ] Chen J , Bottjer D J , Oliveri P *et al.* *Science* , 2004 , 305 : 218
- [ 43 ] Kerr R A . *Science* , 1998 , 279 : 803
- [ 44 ] 彭凡 , 董熙平 . *北京大学学报( 自然科学版)* , 2008 , 44 : 447 [ Peng F , Dong X . *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* , 2008 , 44 : 447( In Chinese ) ]
- [ 45 ] Chen F , Dong X . *Chinese Science Bulletin* , 2008 , 53 : 3860
- [ 46 ] Gilbert S F . *Developmental biology* ( 6th edition ) . Sunderland , Massachusetts : Sinauer associates , INC 2000 . 1—228
- [ 47 ] 陈均远 . *动物世界的黎明* . 南京 : 江苏科技出版社 , 2004 . 1—104 [ Chen J . *The dawn of animal world* . Nanjing : Jiangsu Press of Science and Technology , 2004 . 1—104 ( In Chinese ) ]



· 封面故事 ·

封面图是在 FEI Nova<sup>TM</sup> NanoSEM 600 场发射扫描电镜 (FE-SEM) 上拍摄的, 图片作者是飞利浦研究院的 Frans Holthuysen. 图中三个桦树的花粉 (圆的、黄色、有刺) 粘在西番莲花的花蕊上 (在图中是墨绿色褶皱的基体), 浅绿色的球状颗粒是西番莲花的花粉, 圆环状的是携带有基因信息的花粉颗粒. 场发射扫描电镜更多的应用是在纳米材料的表征上. 纳米科技发展到今天, 纳米材料通常已经不是以往的单一材料, 常规的扫描电镜已经不能满足表征当今多组分的纳米材料的需要, 而高分辨场发射扫描电镜使得对这一类材料的成像和表征变得容易和简单.

( FEI 香港有限公司提供 )