

文章编号: 1004-0374(2013)08-0787-07

## 微体化石3D结构的同步辐射无损成像研究

黎刚<sup>1\*</sup>, 陈均远<sup>2</sup>, 冼鼎昌<sup>1</sup>, 殷宗军<sup>2</sup>, Paul Tafforeau<sup>3</sup>

(1 中国科学院高能物理研究所北京同步辐射装置, 北京 100049; 2 中国科学院南京地质古生物研究所古生物与地层学重点实验室, 南京 210008; 3 欧洲同步辐射装置, 格勒诺布尔 F-38043, 法国)

**摘要:** 瓮安动物化石群是目前已知的最古老的多细胞动物化石群, 其为代表的微体化石有很多重要的科学内涵有待揭示。然而, 无损高分辨 3D 成像方法的缺少长期制约着对微体化石的深入研究。同步辐射硬 X 射线相衬显微断层成像 (PC-SR- $\mu$ CT) 具有高穿透性、高空间分辨率、高密度分辨率等优点。通过几年来的跨领域国际合作研究, 我们发现 PC-SR- $\mu$ CT 非常适合无损高空间分辨率研究微体古生物化石的 3D 结构, 是微体化石研究的理想新手段。首先介绍 PC-SR- $\mu$ CT 方法及其在微体化石无损研究中的相关方法学, 然后简介近几年 PC-SR- $\mu$ CT 在瓮安动物群微体化石研究中的取得的主要成果。

**关键词:** 微体化石; 三维无损成像; 同步辐射; X 射线相位衬度显微断层成像

**中图分类号:** Q913; Q91-3 **文献标志码:** A

## Nondestructive investigation of the 3D structures of micron fossils using synchrotron radiation imaging

LI Gang<sup>1\*</sup>, CHEN Jun-Yun<sup>2</sup>, XIAN Ding-Chang<sup>1</sup>, YIN Zong-Jun<sup>2</sup>, Paul Tafforeau<sup>3</sup>

(1 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 2 State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 European Synchrotron Radiation Facility, F-38043 Grenoble, France)

**Abstract:** The Weng'an fossil fauna from Precambrian Doushantuo phosphates in Weng'an, China, have attracted great attention as the oldest fossil evidence yet found for multicellular animal life on Earth. There are rich important scientific connotations among the Weng'an Fauna fossils as a representative of the micron fossils. However, the potential of the micron fossil fauna has not been fully realized because of the scarcity of the high resolution non-destructive 3D methods. Phase-contrast based synchrotron radiation X-ray microtomography (PC-SR- $\mu$ CT) has the advantages of high penetrability, high spatial resolution and high electron density resolution. In this paper, we present the methodology of the PC-SR- $\mu$ CT and its application in micron fossil investigation, including the related methodology, the main scientific achievements and the problems to be resolved. PC-SR- $\mu$ CT is an ideal tool to investigate the 3D structure of the micron fossils nondestructively.

**Key words:** micron fossil; 3D nondestructive imaging; synchrotron radiation; X-ray phase-contrast microtomography

化石是研究生命起源和演化的重要证据。化石的尺寸跨越多个数量级, 从几十米的恐龙化石至亚毫米的微体化石 (包括胚胎和成体等)。古生物学研究化石的目标是尽可能完整地提取化石的生物学信息, 因此, 不仅化石的外部形态特征很重要, 而且化石内部的三维形态同样很重要。由于重要化石的珍稀性, 无损检测通常是必须保证的前提。无损

地获得化石完整的三维结构特征是古生物学研究, 特别是微体古生物学研究, 越来越迫切的需求。

收稿日期: 2013-07-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(60972116); 国家自然科学基金专项项目(41023008)。

\*通信作者: E-mail: lig@ihep.ac.cn

X 射线断层成像 (CT) 以样品不同部分对 X 射线吸收系数的差异为衬度源, 是使用最广泛的无损检测方法, 其主要局限是对密度变化的灵敏度较低, 且在密度变化小时空间分辨率亦较低。由于大化石中不少生物结构的尺寸较大, 且和围岩的密度差显著, 因此普通 CT 能够揭示大化石中很多有重要意义的结构。因此, 到目前为止, 普通 CT 在三维保存的大化石的无损成像中已经取得了不少成果<sup>[1-4]</sup>, 是无损研究较大三维化石内部结构的有利方法。

但是无损研究微体化石时, 需要密度分辨率和空间分辨率更高的无损成像方法才能获得满意的内部结构图像。普通 CT 的最高空间分辨率虽然可达微米量级, 但要求被测样品有极好的吸收衬度。而微小化石内部密度差通常很小, 仅靠硬 X 射线的吸收衬度成像, 无法获得足够高的成像衬度, 造成实际可获得的空间分辨率大大降低。因此, 基于吸收衬度的工业 CT 无法满足微体三维化石无损研究的需要。微体化石的研究迫切需要兼具高空间分辨和高密度分辨能力的无损 3D 成像方法。

1998 年发现于贵州瓮安陡山沱组地层的瓮安动物化石群是目前已知地球上最古老 (5.8 亿年) 的后生动物化石记录, 它的发现和研究平息了一场对达尔文进化论的“围剿”, 给科学家实证研究后生动物的起源和早期演化提供了独一无二的材料, 为“寒武纪大爆发”事件的重新诠释提供了新的关键性证据<sup>[5-8]</sup>。瓮安生物群被认为是继澳大利亚埃迪卡拉动物群和我国澄江动物群之后, 20 世纪古生物学界又一次伟大发现。著名演化生物学家、美国哈佛大学教授斯蒂芬·古尔德 (Stephen Jay Gould) 在《奇妙的生命》一书中, 将瓮安生物群动物胚胎化石的发现列为 20 世纪国际古生物学界四大进展之首。瓮安动物化石群以保存动物卵和胚胎等为特征, 化石的尺寸在 200~700  $\mu\text{m}$  之间, 多数化石保持着原有的三维结构。然而瓮安动物化石群的诠释充满着挑战, 现有传统方法均存在不同的缺陷。(1) 可见光透射显微成像需要将化石切磨成薄片, 对化石破坏严重, 只能保留不足十分之一的化石, 且对切开的位置和方位无法控制, 很多重要切面的获得有极大的偶然性。该方法不能得到化石的完整信息, 对切片资料的诠释充满了多解性和不确定性, 而且在制作岩石切片的过程中会损耗很多化石标本, 珍稀的标本一旦被破坏就丢失了许多重要的结构信息。(2) 扫描电子显微镜成像法需要先用醋酸溶蚀分离微体化石, 然后在可见光显微镜下手工挑样,

最后用扫描电子显微镜观察。该方法的主要问题是只能观察到化石的表面结构和构造, 不能得到化石内部的信息。加上扫描电镜的载物台倾斜角度有限, 研究人员往往只能获得几个有限角度的照片。此外, 挑样时用可见光显微镜观察, 无法判断表面结构不明显的微体化石的内部是否有重要的生物学结构, 容易在挑样环节漏掉很多重要化石。

对以瓮安动物群古老化石为代表的微体化石的诠释不仅需要智慧和知识, 而且有待 3D 无损成像方法上的突破。同步辐射可以提供性能优异的硬 X 射线和很高的投影成像分辨率, 近年来又发展了一些独特的方法 (X 射线相位衬度成像等) 来提高密度灵敏度, 可以作高空间分辨率、高密度分辨率的相衬三维成像<sup>[9-14]</sup>, 十分适合用来对亚毫米微体化石的内部结构作 3D 无损研究<sup>[15-19]</sup>。在对瓮安动物群具极叶胚胎化石的研究中<sup>[18]</sup>, 同步辐射硬 X 射线相位衬度微 CT (PC-SR- $\mu\text{CT}$ ) 提供了关键证据, 初次展现了 PC-SR- $\mu\text{CT}$  应用于古生物学研究的特长和能力。古生物学与同步辐射的联手为以瓮安动物化石群为代表的微体 3D 化石的诠释开启了全新的窗口<sup>[18-24]</sup>。

对于压缩严重的扁平化石, 无损地恢复其原有 3D 结构的方法学还很不成熟。这类问题属于“大薄”物体的三维成像, 而硬 X 射线分层摄影法 (Laminography) 适合解决此类问题<sup>[15]</sup>。

## 1 同步辐射硬 X 射线相位衬度成像方法

X 射线发现 100 多年来, 以吸收衬度和几何光学为基础的硬 X 射线成像一直是无损检测的重要方法, 在医学诊断、无损探伤、安全检查和科学研究等领域应用广泛。目前, 对重元素为主且密度差异比较大的样品, 硬 X 射线吸收衬度成像的衬度和空间分辨均较好; 但是对轻元素为主的样品 (如生物软组织、高聚物等) 或者密度差别比较小的样品 (如化石内部), 硬 X 射线成像只能获得空间分辨率和成像衬度均较差的图像。

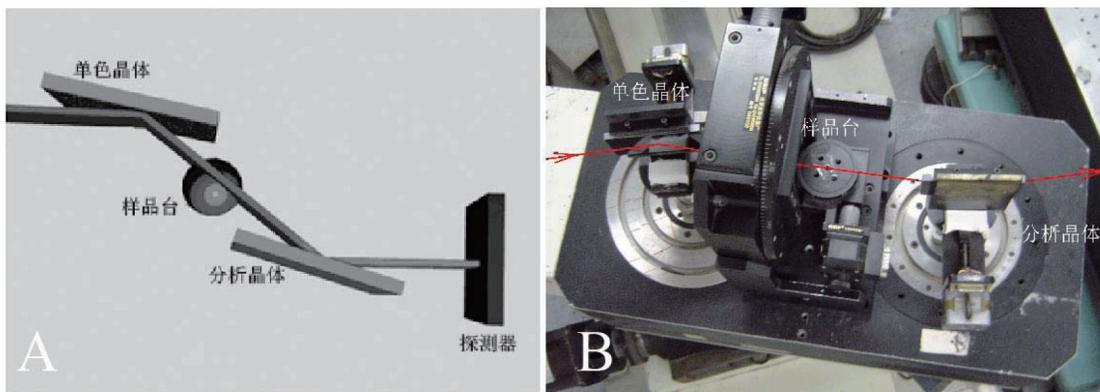
同步辐射是在环形加速器中运行的高能电子放射出的电磁辐射, 能谱从远红外一直到硬 X 射线, 可以用单色器把穿透性很强的硬 X 射线分离出来, 用于 X 射线衍射、谱学和成像等研究。同步辐射硬 X 射线具有高亮度、高准直性和空间相干性较高等优点, 这使得基于同步辐射的硬 X 射线相位衬度成像 (synchrotron radiation phase contrast imaging, SR-PCI) 成为可能, 该方法具有提高硬 X 射线成像密

度分辨能力的潜力, 近年来受到广泛重视。目前 SR-PCI 在生物学、材料学、基础医学等领域的应用研究较多, 古生物学是该方法应用的较新领域。

作为一种电磁波, X 射线穿过样品后, 振幅和相位都会改变。所谓相位衬度成像就是采用某种方法把样品对入射电磁波相位的调制转换成强度分布的变化, 并记录下来, 这种由于相位变化引起的光强的重新分布在特定条件下可以极大地提高硬 X 射线成像的衬度。目前, 有五种方式可以实现 SR-PCI, 分别是干涉法、衍射增强成像法 (diffraction enhanced imaging, DEI)、Zernike 相衬显微术、类同轴全息法和基于光栅的微分相衬成像。它们的共同物理基础是, X 射线穿过样品后, 相位的改变正比于在其路径上样品电子密度的积分。通过测量 X 射线穿过样品后其相位的改变量或相位改变的梯度或二阶导数等引起的光强重新分布, 可以得到样品内部电子密度的分布, 进而得到样品内部的结构信息。

本文所用的相衬成像是 DEI 和类同轴全息成像<sup>[9-14]</sup>。

DEI 成像的关键是置于样品和探测器之间的分析晶体。同步辐射白光通过 X 射线单色器 (有单晶 Bragg 或双晶 Bragg 等多种) 被单色化, 单色后的 X 射线穿过样品, 被样品吸收、折射和散射。吸收使 X 射线的强度发生衰减, 而折射和散射使 X 射线的前进方向发生改变。分析晶体摇摆曲线的半高宽很窄, 只能允许很小角宽度内的 X 射线通过并到达探测器被成像 (图 1)。因此, 分析晶体相当于一个很窄的角度滤波器, 把从样品出射方向略有不同的透射光、折射光和散射光分离开来成像, 分别得到以吸收、折射和散射衬度为主的图像, 可以明显提高弱吸收衬度样品的 X 射线成像衬度, 突出显示引起不同衬度的结构。DEI 成像要求入射硬 X 射线的平行度较高, 普通 X 光机由于光强低、发散角大, 实现这种方法比较困难, 而在同步辐射光源上实现



A: DEI示意图; B: 北京同步辐射4W1A束线DEI成像装置实物

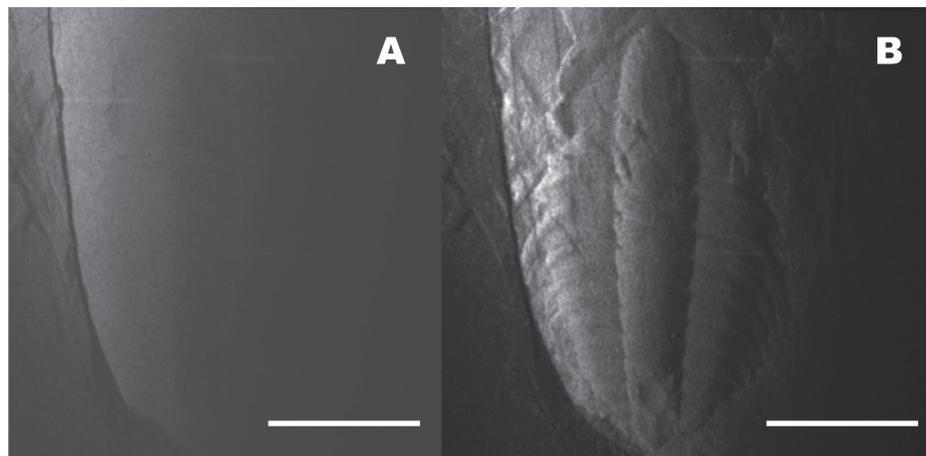
图1 衍射增强成像(DEI)示意图与实物装置<sup>[12]</sup>

起来比较容易。

近年来, DEI 成像方法和生物医学应用研究在国内外同步辐射装置上已有较多开展<sup>[9-12]</sup>。Li 等<sup>[12]</sup>于 2004 年首先在国内报道了利用北京同步辐射 4W1A 束线的实验; 同年, 他在日本光子工厂 (Photon factory, PF) 访问期间, 率先在国际上开展 DEI 方法应用于化石的无损成像 (图 2)。实验标本是一块发现于我国云南澄江寒武纪早期岩层中的三叶虫化石, 化石整体包埋在泥岩中, 只有背部部分暴露出来, 由于脱水和压力的作用, 三叶虫在垂直方向被压缩得很严重, 样品和基岩间的密度差很小。在吸收衬度像图 2A 中能够分辨出来的细节很少,

成像的衬度较差; 但是, 在包含相位衬度的图 2B 中, 图像的衬度改善了很多, 可以分辨出三叶虫的三叶状轮廓和体节等解剖细节。这一研究阐明了用 DEI 成像方法同样可以有效提高化石样品 X 射线成像的衬度。

类同轴全息成像利用空间相干的 X 射线穿过样品后在像空间的自由传播把和相位变化的二阶导数相关的强度变化记录下来, 原理和 Gabor 同轴全息成像相似<sup>[13-14]</sup>, 它同样能够明显提高 X 射线成像的衬度。该方法要求入射 X 射线有一定的空间相干性, 且样品到成像面的距离等于 Fresnel 衍射区的特定值。类同轴全息成像理论比较成熟, 对实验设



成像所用X射线能量是33.7 keV, 分析晶体是Si(440), 样品厚度 1 mm, 探测器是X-Ray CCD, 像素大小6  $\mu\text{m}$ 。实验在日本PF超导扭摆器为光源的BL14B光束线进行。标尺长度2.5 mm

图2 三叶虫化石(产自中国云南澄江帽天山)的DEI像(图B, 分析晶体位于摇摆曲线的半腰处, 成像衬度主要来自折射效应)和吸收衬度像(图A, 分析晶体在摇摆曲线峰位)

备要求相对简单, 易于和 CT 技术结合实现相位衬度的三维成像。最早探索类同轴全息成像的古生物学应用的是本文的合作者, 在 ESRF 工作的 Paul Tafforeau 博士, 他对很多种类化石在类同轴全息 CT 中的成像特征和成像条件的优化作了研究, 阐明了同步辐射类同轴全息 CT 成像在化石无损成像研究上优点, 如无硬化、空间分辨率高、成像速度快和密度分辨率高(相位衬度成像)等(图3)<sup>[17]</sup>。

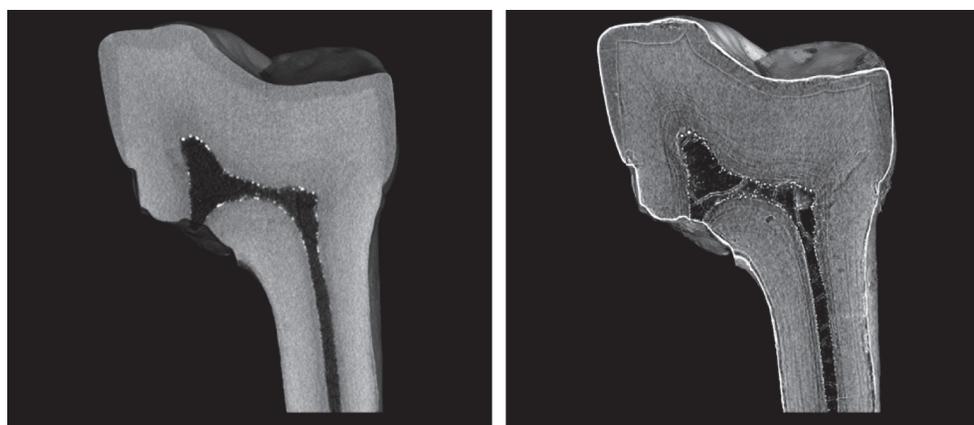
总之, SRX-PCI 在化石样品的无损成像中表现出比传统吸收衬度成像更高的密度分辨能力, 可以明显改善化石内部结构的成像衬度; 此外, 高亮度

且小发散角的同步辐射使得 SRX-PCI 可以获得很高的投影成像空间分辨率, 目前最高可到亚微米空间分辨。

## 2 同步辐射相衬微CT在瓮安动物化石群微体化石无损研究中的应用

瓮安动物群化石的特点是保持三维结构且直径较小(0.2~0.7 mm), 用普通手段难以无损地研究其内部三维结构。

用同步辐射硬 X 射线相衬微 CT(PC-SR- $\mu\text{CT}$ ) 研究瓮安微小化石的方法学探索于 2002 年在北京



样品来自缅甸中始新世纪末期的待定灵长类动物。左图: 吸收衬度CT的虚拟纵剖面图, 物像距离10 mm; 右图: 物像距离990 mm。实验在ESRF ID19完成, 像素尺寸6.7  $\mu\text{m}$ , X射线能量50 keV。在右图中, 相位衬度清楚地揭示, 珐琅牙质结和牙本质中很多不同尺度的特征结构

图3 臼齿化石的吸收像和类同轴相位像的对比<sup>[17]</sup>

同步辐射装置 (BSRF) 开始, 而后在日本的 PF 和 SPring-8 这两个同步辐射光源上进行, 最终在欧洲同步辐射装置 (European synchrotron radiation facility, ESRF) 上获得了空间分辨率和成像衬度都满意的 PC-SR- $\mu$ CT 投影图。经过断层重建, 得到每层厚度仅为亚微米的一系列断层图像; 最后经过图像的 3D 重建、后处理和分析得到化石的 3D 信息。3D 数据的处理和分析是从原始数据得到有用 3D 信息的重要步骤, 主要在 BSRF 完成。

PC-SR- $\mu$ CT 应用于瓮安动物群微体化石研究的第一个成功范例是瓮安动物群三分体胚胎化石中是否包含具极叶构造胚胎的确认研究<sup>[18]</sup>。著名古生物学家陈均远教授在瓮安动物群三维保存的微体胚胎化石中发现了不少三分体胚胎化石, 可能的原因有非同步分裂或产生极叶等。但仅通过扫描电子显微镜 (SEM) 对胚胎化石表面形貌的观察, 无法判断到底是哪个原因。PC-SR- $\mu$ CT 方法首先在部分三分体胚胎化石中发现极叶存在的直接证据——极叶与可能的 D 细胞之间的细胞质颈状通道, 极叶和另一裂球之间则由完整的细胞壁分隔开来 (图 4)。此外, 通过对三分体胚胎化石的 PC-SR- $\mu$ CT 三维图像的数据分割和统计分析, 可以得到每个裂球的体

素数目, 再根据实验条件算出每个体素的体积, 这样即可高精度地直接得到每个裂球的体积。再结合对更多三分体胚胎的 SEM 观察与分析, 得到几十枚三分体胚胎各裂球体积之间的互补关系和恒比关系<sup>[18]</sup>, 这就为排除非同步卵裂等偶然因素提供了证据。进一步的后续研究发现了更多处于不同发育阶段的此类化石, 为具极叶胚胎在瓮安动物群中的存在提供了进一步证据<sup>[23]</sup>。

PC-SR- $\mu$ CT 在具极叶胚胎化石发现中的上述两点贡献显示了这一方法在微体化石研究中的主要优点: 无损高分辨率定量的内部结构的三维成像。具极叶胚胎的发现填补了生命演化记录中的一个重要缺失环节, 为前寒武纪两侧对称动物演化史提供了新的证据。该工作于 2006 年 6 月在 *Science* 杂志发表<sup>[18]</sup>, 引起了广泛的关注。*Nature* 和 *Science* 杂志都作了热点报道, 并被评为 2006 年中国十大科技新闻第二名。这项工作也是 PC-SR- $\mu$ CT 应用于微体化石研究取得的第一个重要成果。

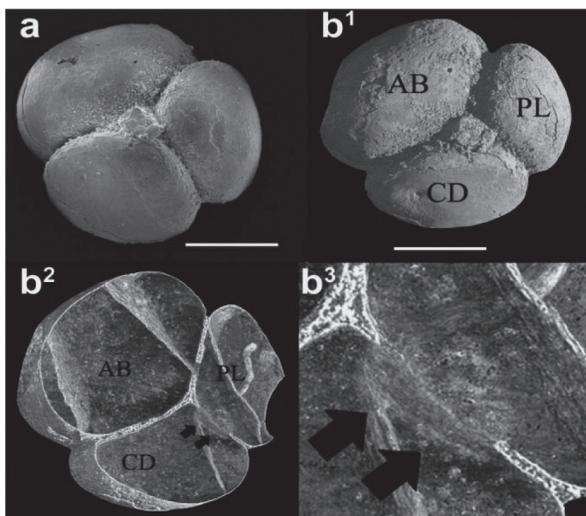
此后 2006 年 8 月和 10 月, 又分别有两项 PC-SR- $\mu$ CT 用于微体化石的研究在 *Nature*<sup>[19]</sup> 和 *Science*<sup>[20]</sup> 杂志发表。中国学者能够在如此激烈的国际竞争中取得领先, 得益于古生物学高水平研究和同步辐射相衬成像这一新方法之间及时的跨领域国际合作。

具极叶胚胎化石的无损研究只是 PC-SR- $\mu$ CT 微体化石应用的开始, 下面简要介绍随后对瓮安动物群微体化石的更多的同步辐射无损成像研究。

2009 年, 本课题组利用同步辐射相衬显微 CT 对两颗保存精美且有极性分化的瓮安动物群胚胎化石进行了研究, 相关成果发表在 *PNAS* 上<sup>[21]</sup>。这是继具极叶胚胎化石发现以来, PC-SR- $\mu$ CT 无损研究为瓮安动物群中已经存在两侧对称动物添加的又一重要证据。

由于瓮安动物群中绝大部分动物化石处在囊胚期之前的卵裂阶段, 囊胚期之后的化石稀少, 成体化石更难觅踪影, 故有学者认为, 瓮安生物群中动物胚胎在细胞增长到成百上千的数量时仍然没有分化, 缺失原肠胚期及之后的阶段。

通过合作研究, 利用 ESRF 的同步辐射 X 射线相衬显微 CT 装置, 先后对来自瓮安动物群的数百枚保存精美的胚胎化石进行了微 CT 成像和三维结构重建分析。在其中发现两枚分裂早期就已经开始细胞迁移和分化的胚胎化石, 并在此基础上产生了极性, 即出现了前后轴、背腹轴和左右轴。这正是



图b<sup>1</sup>中第二大裂球可认定为 CD 细胞, 因为它和可能的 AB 细胞(最大裂球)间通过细胞膜样的结构完全分隔(图b<sup>2</sup>), 但是的确和可能的极叶 PL(最小裂球)通过细胞质的颈状通道相连接(图b<sup>2</sup>和b<sup>3</sup>)。PC-SR- $\mu$ CT 成像在 ESRF ID19 完成, 物像距离 300 mm, 吸收和相衬信息一起重建, X 射线能量 23 keV, 像素尺寸 0.7  $\mu$ m。标尺长度 250  $\mu$ m

图4 瓮安动物群三分体胚胎的 SEM 像(图a)和同步辐射相衬显微 CT 像(图b)

三胚层两侧对称动物所独有的生物学特征, 这些特征表明它们与两侧对称动物有着十分密切的亲缘关系(图5)。需要指出的是, 这两颗胚胎化石在细胞迁移和重排的过程中采用了完全不同的机制, 暗示两者可能来自不同的分类群, 这不仅说明三胚层两侧对称动物不仅在5.8亿年前的晚前寒武纪就已经崛起, 而且有了相当程度的分化, 这为了解寒武纪大爆发之前后生动物的演化历程提供了重要线索。

最近又有几项PC-SR- $\mu$ CT研究瓮安动物群微体化石的结果在古生物学专业杂志上发表, 包括对瓮安动物群胚胎的系统发生多样性及其进化意义的研究<sup>[22]</sup>, 具极叶胚胎存在的进一步证据<sup>[23]</sup>和胞质分裂胚胎化石的生物和埋藏学意义<sup>[24]</sup>等。此外, 通过近几年PC-SR- $\mu$ CT的无损高分辨三维成像研究, 在瓮安动物化石群中还发现了两侧对称动物所特有的盘型卵裂胚胎化石、双分卵裂胚胎化石和具大D卵裂球胚胎发育序列, 并首次发现了扁虫状成体化石。其中双分卵裂胚胎分布在现生涡虫动物纲; 具大D卵裂球胚胎发育序列在现生软体动物、节肢动物等类群中广为分布。上述发现的文章正在评审或修改中, 在此暂不作详细介绍。

通过对大量胚胎化石的PC-SR- $\mu$ CT研究, 进一步证明两侧对称动物不仅在瓮安化石群已经出

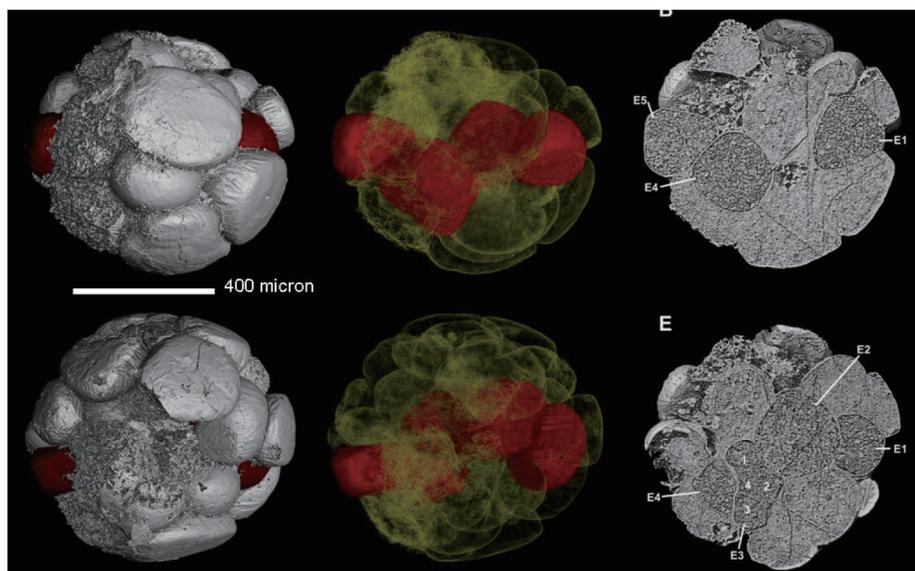
现, 而且已经开始了分化。

### 3 微体化石研究对PC-SR- $\mu$ CT的要求

用PC-SR- $\mu$ CT研究微体古生物化石内部结构时, 以下三点对最终结果的质量有很大影响。(1)同步辐射X射线光源性能, 特别是光源对样品的点扩展函数要足够小。这不仅可保证投影成像的高空间分辨率, 还可保证入射到样品上的X射线的高空间相干性, 这是通过类同轴相衬成像获得高密度分辨率的必要条件, 也是3D成像高空间分辨率和高密度分辨率的基础。(2)高性能X射线成像探测器是PC-SR- $\mu$ CT的核心设备, 其空间分辨率、调制传递函数、读出速率等都对PC-SR- $\mu$ CT成像的效果有直接影响。(3)3D数据的重建和处理得到高质量的相位衬度投影像只是开始, 投影数据的高精度断层重建和3D重建与处理则是更为重要的后续工作。其中主要难点是相位信息的恢复、物理修正的引入和伪影的消除等。此外, 由于每个样品的断层重建结果都很大, 且3D重建和分析需要人机交互, 对计算机内存的需求往往比较大。

### 4 结论和展望

总结十几年来的研究, PC-SR- $\mu$ CT用于微体



左侧上下两图分别是该胚胎的右侧视图和背侧视图, 其中可见前后端细胞和可能的内胚层细胞索在两端露出的细胞(红色)。可能的内胚层细胞在PC-SR- $\mu$ CT成像的衬度上和其他细胞明显不同, 这在左侧上下两图的虚拟剖开图(右侧上下两图)中显示得很明显。据此, 通过三维数据的虚拟分割和不同显示, 可能内胚层的细胞用红色显示于其他四幅图中, 从右侧看它在背腹方向呈浅S形并从前端贯穿至后端(中间上下两图)。PC-SR- $\mu$ CT成像在ESRF的ID19进行, 所用X射线能量23.3 keV, 像素0.7  $\mu$ m。本图标尺为400  $\mu$ m

图5 在瓮安动物群中发现的复杂胚胎化石(4F4)的PC-SR- $\mu$ CT图像

化石 3D 结构的无损成像有三个优点。(1) 同步辐射硬 X 射线具有高亮度、高准直性和较高空间相干性等常规硬 X 射线光源所没有的优点, 使得硬 X 射线相位衬度成像成为可能。硬 X 射线相位衬度成像可以明显提高化石样品的成像衬度。(2) 同步辐射硬 X 射线投影成像的空间分辨率高, 可到亚微米量级, 高分辨成像的速度快。(3) 同步辐射可使用单色硬 X 射线成像, 克服了普通 X 光机光源在化石成像时通常会遇到的硬化伪影问题。

总之, PC-SR- $\mu$ CT 非常适合无损研究以瓮安动物群为代表的微体化石的内部结构。虽然还存在一些方法学问题有待探索解决, 但因为具有高穿透性、高空间分辨率、高密度分辨率等优点, PC-SR- $\mu$ CT 可以为古生物学, 特别是微体古生物学的研究提供高空间分辨、高灵敏度的无损三维成像手段。通过对大量微体胚胎化石的 PC-SR- $\mu$ CT 研究, 进一步阐明了两侧对称动物在瓮安化石群不仅已经出现, 而且已经开始分化。

**致谢:** 本研究的同步辐射成像实验在北京同步辐射装置(BSRF)4W1A束线、日本的光子工厂(PF)BL14B束线、欧洲同步辐射装置(ESRF)ID19束线(课题编号: ME1239)以及美国先进光子源(APS)的BM2B束线(课题编号: GUP8395)进行, 在此对相关同步辐射装置和人员一并表示感谢。

#### [参 考 文 献]

- [1] Witmer LM, Chatterjee S, Franzosa J, et al. Neuroanatomy of flying reptiles and implications for flight, posture and behaviour. *Nature*, 2003, 425(6961): 950-3
- [2] Alonso PD, Milner AC, Ketcham RA, et al. The avian nature of the brain and inner ear of Archaeopteryx. *Nature*, 2004, 430(7000): 666-9
- [3] Zollikofer CP, Ponce de León MS, Lieberman DE, et al. Virtual cranial reconstruction of *Sahelanthropus tchadensis*. *Nature*, 2005, 434(7034): 755-9
- [4] Brown P, Sutikna T, Morwood MJ, et al. A new small-bodied hominin from the Late Pleistocene of Flores, Indonesia. *Nature*, 2004, 431(7012): 1055-61
- [5] Li CW, Chen JY, Hua TE. Precambrian sponges with cellular structures. *Science*, 1998, 279(5352): 879-82
- [6] Xiao SH, Zhang Y, Knoll AH. Three-dimensional preservation of algae and animal embryos in a Neoproterozoic phosphate. *Nature*, 1998, 391(6667): 553-8
- [7] 陈均远. 动物世界的黎明[M]. 南京: 江苏科技出版社, 2004: 76
- [8] Chen JY, Bottjer DJ, Oliveri P, et al. Small bilaterian fossils from 40 to 55 million years before the Cambrian. *Science*, 2004, 305(5681): 218-22
- [9] Fitzgerald R. What really gives a quantum computer its power? *Phys Today*, 2000, 53(1): 20-3
- [10] Davis TJ, Gao D, Gureyev TE, et al. Phase-contrast imaging of weakly absorbing materials using hard X-rays. *Nature*, 1995, 373(6515): 595-7
- [11] Chapman D, Thomlinson W, Johnston RE, et al. Diffraction enhanced x-ray imaging. *Phys Med Biol*, 1997, 42(11): 2015-26
- [12] Li G, Wang N, Wu Z. Hard X-ray diffraction enhanced imaging only using two crystals. *Chn Sci Bull*, 2004, 49(20): 2120-5
- [13] Snigirev A, Snigireva I, Kohn V, et al. On the possibilities of x-ray phase contrast microimaging by coherent high-energy synchrotron. *Rev Sci Instrum*, 1995, 66(12): 5486-92
- [14] Wilkins SW, Gureyev TE, Gao D, et al. Phase-contrast imaging using polychromatic hard X-rays. *Nature*, 1996, 384(6607): 335-7
- [15] Helfen L, Baumbach T, Mikulik P, et al. High-resolution three-dimensional imaging of flat objects by synchrotron-radiation computed laminography. *Appl Phys Lett*, 2005, 86: 071915
- [16] Ando M, Chen JY, Hyodo K, et al. Nondestructive visual search for fossils in rock using x-ray interferometry imaging. *Jpn J Appl Phys*, 2000, 39: L1009-11
- [17] Tafforeau P, Boistel R, Boller E, et al. Applications of X-ray synchrotron microtomography for non-destructive 3D studies of paleontological specimens. *Appl Phys A*, 2006, 83(2): 195-202
- [18] Chen JY, Bottjer DJ, Davidson EH, et al. Phosphatized polar lobe-forming embryos from the Precambrian of southwest China. *Science*, 2006, 312(5780): 1644-6
- [19] Donoghue PC, Bengtson S, Dong XP, et al. Synchrotron X-ray tomographic microscopy of fossil embryos. *Nature*, 2006, 442(7103): 680-3
- [20] Hagadorn JW, Xiao SH, Donoghue PC, et al. Cellular and subcellular structure of neoproterozoic animal embryos. *Science*, 2006, 314(5797): 291-4
- [21] Chen JY, Bottjer DJ, Li G, et al. Complex embryos displaying bilaterian characters from Precambrian Doushantuo phosphate deposits, Weng'an, Guizhou, China. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106(45): 19056-60
- [22] Chen JY, Bottjer DJ, Davidson EH, et al. Phase contrast synchrotron X-ray microtomography of Ediacaran (Doushantuo) metazoan microfossils: phylogenetic diversity and evolutionary implications. *Precambrian Res*, 2009, 173: 191-200
- [23] Yin Z, Zhu M, Tafforeau P, et al. Early embryogenesis of potential bilaterian animals with polar lobe formation from the Ediacaran Weng'an biota, South China. *Precambrian Res*, 2013, 225: 44-57
- [24] Yin Z, Liu P, Li G, et al. Biological and taphonomic implications of Ediacaran fossil embryos undergoing cytokinesis [J/OL]. *Gondwana Res*, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2013.01.008>