

# CT技术在古人类学上的应用及进展\*

吴秀杰<sup>1\*\*</sup> Lynne A Schepartz<sup>2</sup>

1. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044;

2. Department of Anthropology, Florida State University, Tallahassee, Florida 32306-7772, USA

**摘要** 古人类化石是探索人类起源和演化的重要研究材料, 由于人类化石标本的珍贵性, 不可能对其进行实体解剖, 传统的研究方法只能停留在化石的外表形态特征的研究上. CT技术为古人类学的发展开辟了广阔的前景. 目前, CT技术在中国古人类化石上的应用还很薄弱, 很多具体的工作还没有开展. 为了对CT技术在古人类学上的应用情况有个全面、系统的了解, 文中对近年来CT在国际古人类学界的研究及进展作综述, 包括: 化石标本的虚拟复原; 颅内模及脑形态特征的研究; 骨骼生物力学分析; 木乃伊及早期人类的身体健康状况; 骨骼和牙齿的微细解剖结构. 对未来工作加以展望.

**关键词** 古人类学 人类化石 CT 三维重建 虚拟解剖

古人类学是研究人类起源和进化的科学, 通过对地层中保留下来的早期人类骨骼、牙齿及人类活动遗物、遗迹的研究, 探讨不同演化阶段的古人类成员的体质特征、生存方式和演化过程. 由于长期受到地层的挤压和水流的侵蚀, 古人类的化石标本经常破碎、变形或黏附有坚硬的地层胶结物, 为避免破坏标本, 研究工作一般只是停留在标本的外表形态上, 传统的方法阻碍了对化石标本的深入研究.

1895年, 德国物理学家 Röntgen 发现可以用来获取物体内部结构的 X 射线<sup>[1]</sup>. 1905年, 古人类学家把这种射线应用到距今 13 Ma 的尼安德特人健康状况的研究中, X 线平片显示出患有创伤、良性骨瘤和骨膜炎个体的表现情况<sup>[2]</sup>. 尽管 X 射线在诊断骨骼系统病变的方面起了划时代的作用, 但也存在明显的不足, 如: X 线平片是复合投影, 只能显示物体二维的平片图像, 对于复杂和重叠部位容易遗漏; X 线平片的组织分辨率低, 不能检测石化的或附有地层填充物的骨骼样品等<sup>[3]</sup>. 1972年, 英国电子工

程师 Hounsfield 发明了 CT (computerized tomography) 技术<sup>[4]</sup>. CT 可以无损伤地显示物体的三维结构, 与 X 线平片相比, 具有密度分辨率高、断层图像无重叠和丰富的图像后处理技术等优势. 很快, 这种技术被应用到医学领域中.

近 30 年来, CT 设备与技术的发展非常迅猛, 围绕着加快扫描速度、提高图像质量、简化操作、提高工作效率等方面, 已先后发展了从头颅 CT 到螺旋 CT 和超高速 CT 等五代 CT. 1984年, 古人类学家 Conroy 和放射学家 Vannie 探索性地利用 CT 技术对距今 30 Ma 的哺乳动物头骨化石进行了扫描, 3D 影像成功地显示出沉积物层、骨壁层和空气层密度的差异<sup>[5]</sup>, 随即他们把这种技术应用到珍贵的人类头骨化石的研究中<sup>[6, 7]</sup>.

CT 技术可以在不破坏标本的情况下, 对古人类化石进行高分辨率的断层扫描, 结合图像处理技术, 获得高精度的外表以及内部结构的三维图像, 成为研究人类化石标本的强大工具. 本文对近年来

2008-06-08 收稿, 2008-08-08 收修改稿

\* 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (编号: KZCX2-YW-106)、国家自然科学基金 (批准号: 40772018) 和国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB806400) 资助项目

\*\* E-mail: wuxiujie@ivpp.ac.cn

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

CT 在国际古人类学界的研究及进展作以综述, 对未来工作加以展望。

## 1 古人类化石研究使用的 CT 设备

按其用途, 目前用于古人类化石扫描的 CT 机有医用 CT、工业 CT 和显微 CT 三种类型。

医用 CT 主要用于临床人体各系统器官宏观病理的诊断, 其优点是扫描速度非常快, 以避免过多的 X 射线对人体的危害。目前, 超高速医用 CT 的空间分辨率为 0.35 mm, 对于临床诊断来说, 其图像的分辨率已足够。很多医院都配备有 CT 设备, 古人类化石表面结构的矫正复原, 或者石化程度很浅的标本的内部结构的观察, 通常选用医用 CT<sup>[6-9]</sup>。

工业 CT 和微 CT 射线辐射的剂量较大, 对物体的穿透力远远大于医用 CT。对于石化程度较深的化石标本, 可以清晰地显示出其内部的解剖特征。工业 CT 的空间分辨率为 5—20  $\mu\text{m}$ , 尺寸较大的古生物标本 (如人类头骨) 的内部结构及微细的解剖特征, 工业 CT 扫描效果比较好<sup>[10, 11]</sup>。显微 CT 的空间分辨率可达到 10  $\mu\text{m}$  以下, 主要用于较小骨骼标本或牙齿的内部微细解剖结构的研究<sup>[12, 13]</sup>。

## 2 CT 技术在国际古人类学界的研究及进展情况

### 2.1 化石标本的虚拟复原

地层中出土的化石标本, 传统的研究方法是先人工去除化石附着的胶结物, 然后使用石膏、硅胶等材料, 对标本缺失的部位进行修补。为避免破坏标本, 很多工作只能停留在化石标本的外表形态上。利用 CT 技术可以无损伤地对化石标本的层面进行扫描, 取得信息, 经计算机处理获得二维断层扫描图片, 利用可视化 3D 图像处理软件 (如 Amira, 3D Slicer, Mimics 等), 在电脑上去除附在骨骼周围的地层胶结物, 对破碎变形的部位进行修补和矫正, 复原出高度精确的模型供古人类学家进行深入研究。

复原工作的最重要的步骤是去除每块骨片内外表面附着的胶结物层。由于每例标本的埋藏环境不同, 沉积物密度的变化很大, 有些沉积物的密度比标本大, 有些密度同骨壁类似, 按照现生骨骼密度设置的扫描参数通常不可用, 需要对每例标本进行

校对和对二维图片进行分割提取。通过改变扫描参数, 显示出标本各层密度的不同, 区分开围岩、充填物及化石的骨壁层, 将骨片从填充物中游离出来<sup>[14]</sup>。

古人类化石标本多不完整, 利用 3D 图像软件, 通过镜像原理可以补充化石缺失的部位, 对破碎的骨骼碎片进行重新组装, 复原出较为精确的古人类模型。例如, 距今 30 ka 左右的尼安德特人 St. Ce' saire 头骨化石被发现时, 已经破裂成很多块, 头骨左侧面除两颗牙齿外基本缺失。由于骨质非常脆弱, 人工复原很容易损伤标本。2002 年, Zollikofer 等<sup>[15]</sup> CT 扫描了 St. Ce' saire 所有的骨片, 在计算机屏幕上将骨骼碎片从地层填充物中分别地游离出来, 然后对这些碎骨骼碎片重新组合, 按照镜像原理, 修补出缺失的左侧部分, 复原出了较为完整的古人类头骨模型 (图 1 (a))。

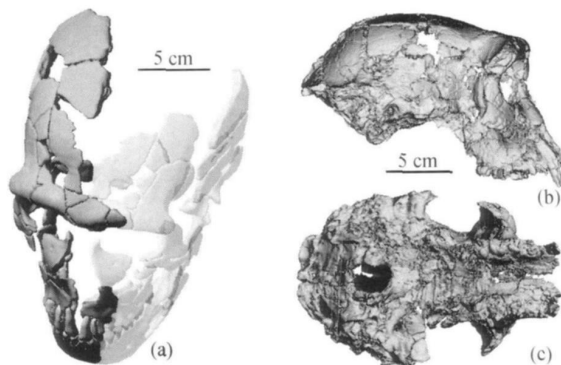


图 1 利用 CT 技术修补矫正破碎变形的古人类化石标本 (a) 破碎头骨碎片的修复制复原<sup>[15]</sup>; (b) 乍得撒海尔人变形头骨<sup>[15]</sup>; (c) 乍得撒海尔人变形头骨的三维校正<sup>[17]</sup>

2002 年发现于中非的乍得共和国北部的沙漠地区的距今约 7 Ma 的“乍得撒海尔人”头骨化石, 由于受到地层的挤压, 整个头盖部严重变形。对“乍得撒海尔人”的演化地位, 学术界一直存有争议: 一些学者认为“乍得撒海尔人”具有猿和人的混合特征, 很可能代表着人猿分别后最早的人科成员; 另外一些学者对将其归属为最早的人类成员持怀疑态度, 提出“乍得撒海尔人”可能只是早期的大猩猩<sup>[16]</sup>。2005 年, Zollikofer 等<sup>[17]</sup> 利用 CT 技术对其进行了三维复原, 矫正了“乍得撒海尔人”头骨变形的部位 (图 1 (b), (c))。CT 图像显示“乍得撒海

尔人”眶底与颅骨基部形成的角度比四足行走的猿类小很多。头骨的形态特征同人类相似；枕骨大孔的方向是朝下的，这与直立行走有关，而两腿直立行走是区分人和猿的重要标准。

此外，利用CT技术还可以对古人类进行颅面复原。颅面复原是指根据人类的颅骨恢复面部的容貌，广泛应用于刑侦、考古等领域。传统的手工复原是用黏土或类似的物质在头骨或头骨模型上重造肌肉和皮肤，耗时长，不能重现皮肤纹理，缺乏质感，复原效果不理想。计算机辅助颅面复原技术为面部复原提供了新途径。借助3D面部软组织三维重建软件，可以重复、快速、精确地重建远古人类的面部容貌。

## 2.2 虚拟颅内模及脑形态特征

颅内模作为古人类大脑形态的固化保存形式，储存着古人类脑的解剖、生理和进化等方面的信息，是分析和探索人类脑进化的最直接的证据<sup>[18]</sup>。天然形成的颅内模非常罕见，传统的脑演化研究材料是人工复制的颅内模，即使用硅橡胶或石膏填充法把颅骨内面的形态特征复原出来。因古人类化石的头骨多不完整，且颅腔内常附有地层的胶结物，故而理想的颅内模很难获得。CT技术的出现，为颅内模的复原和脑演化的研究提供了广阔的空间。

CT技术结合3D可视化图形处理软件，可以无损伤地去除颅腔内的胶结物，三维重建虚拟的头骨和颅内模。重建后的图像通过改变透明度，可以只显示头骨或者只显示出颅内模，或者同时显示头骨和颅内模，观察部分或整体效果。图像可以在虚拟的空间旋转，通过3D图形软件的测量工具，对本体的尺寸、角度、面积和体积进行测量。

脑量的增大是人类进化上的重要标志之一，准确地测量脑量，对于判断古人类化石的系统演化地位有着非常重要的意义。同传统的种子填充法和公式法相比，利用CT技术可以获得更为精确的化石人类颅容量值<sup>[6, 19]</sup>。1990年，Conroy等<sup>[7]</sup>采用CT技术去除了南方古猿MLD37/38头骨化石的颅内胶结的地层填充物，复原了MLD37/38颅内模缺失的右侧额叶、双侧枕叶、整个右颞叶和大部分左颞叶，在计算机上测得其颅容量 $425\text{ cm}^3$ ，低于先前采用公式法计算的 $480\text{ cm}^3$ <sup>[20]</sup>和 $435\text{ cm}^3$ <sup>[21]</sup>。1998年，

Conroy等对仅保留有左侧变形头盖骨的南方古猿Stw505进行了虚拟复原，测得其颅容量 $515\text{ cm}^3$ <sup>[9]</sup>。2007年，Falk等<sup>[22]</sup>利用CT技术复原了南方古猿汤恩男孩的颅内模。汤恩男孩具有天然形成的右半侧颅内模，人工法测其颅容量为 $440\text{ cm}^3$ <sup>[23]</sup>。CT技术重新修补复原了汤恩男孩缺失的左侧颅内模，测量其颅容量为 $382\text{ cm}^3$ ，估计成年后颅容量为 $406\text{ cm}^3$ <sup>[24]</sup>。

颅内模保存有大脑表面的形态特征，通过CT技术可以复原出虚拟的颅内模，促进了人类脑演化的研究。2005年，Balzeau等采用CT技术研究了印度尼西亚出土的直立人Mojokerto男孩的颅内模。CT影像显示Mojokerto男孩脑较低，额叶扁平；而现代人相似年龄儿童的大脑圆隆、脑较高，提示脑的生长和发育模式在进化过程中发生了变化<sup>[24]</sup>。

2003年，印度尼西亚弗洛里斯岛出土了距今1.8Ma的“小矮人”化石(LB1)。LB1身高不到1m，颅容量只有 $380\text{ cm}^3$ 。很多人认为LB1可能是智力低下的小头畸形患者或者是一个侏儒。2005年，Falk等<sup>[25]</sup>利用CT技术复原了LB1虚拟的颅内模，发现LB1虽然脑量很小，但脑的形状和沟回特点却同直立人很相似，其额叶的左侧部包含有扩大的Broca's区，颞叶较大。小头畸形患者虽然脑量同LB1相近，但脑的形态特征却有很大差别：小头畸形患者的小脑突出且占整个脑的比例较大，额叶表面扁平，眶区较窄。通过与小头畸形患者、正常人现代人和直立人颅内模比较，Falk等提出LB1并不是患头部畸形综合病的患者，而是充满智慧的同直立人有着共同祖先的一类灭绝的矮小人类。

## 2.3 人体骨骼生物力学分析

现代人骨骼系统强壮、灵巧、有弹性，既能够支持体重，又能够灵活运动，同时还能保护内脏系统，这种骨骼系统是人类适应环境长期进化的结果。通过对早期人类遗骸生物力学的分析，获取骨骼形态特征时空变异的信息，探讨环境对人类骨骼结构及功能的影响<sup>[26]</sup>。

早期人类，如南方古猿，牙齿尺寸较大，面骨和下颌骨粗壮；现代人类，牙齿尺寸较小，面骨和下颌骨纤细。在人类进化过程中，头骨的形状特征变化很大。对于头骨演化的原因，目前还不是很清楚。一些学者提出，与咀嚼功能相关的形态特征，如下颌

骨、牙齿和面骨,可能受其所吃食物影响<sup>[27]</sup>. Mavropoulos 等利用微 CT 技术研究了咀嚼的功能性和力学性的不同要求对幼年大鼠下颌牙槽骨结构适应性的影响,结果显示,咀嚼功能对下颌骨密度和各种骨小梁的微细结构有影响,长期摄入软食导致咀嚼时牙槽骨负荷减低,骨小梁密度、体积和厚度均降低<sup>[28]</sup>. 1991年, Daegling 采用 CT 技术对南方古猿非洲种和粗壮种下颌骨的骨生物力学性能进行了研究,发现南方古猿非洲种和粗壮种密质骨的面积和空间分布较大,与现生大猿、现代人、和其他化石人类明显不同<sup>[29]</sup>. 密质骨的分布与咀嚼功能可能相关,下颌骨联合处密质骨横断面的比例最大,舌侧密质骨厚度明显大于颊侧,这与咀嚼时下颌骨联合处张力和压力分布较多有关<sup>[30]</sup>.

1985年,在肯尼亚 Nariokotome 地区发现了迄今世界上最为完整的距今 1.6 Ma 的直立人骨架,编号为 KNM-WT 15000,通常也称之为特卡纳男孩. 1994年, Ruff<sup>[31]</sup> 等对此标本的股骨进行了力学分析,CT 影像显示特卡纳男孩密质骨不粗壮,骨髓腔较大,股骨横切面的形态特征似现代青春期少年,而与直立人成年个体不同. 直立人骨髓腔较小,密质骨比现代人厚. 特卡纳男孩同现代人不同的生长发育过程提示,骨的形态特征在不同的生长阶段受到环境因素的影响较大.

CT 技术可以 3D 复原股骨的三维结构,显示股骨横切面的特性,准确地测量股骨的大小、密质骨的厚度、面积及密度的变化. 2000 年底,在肯尼亚中部的图根山地区发现了距今 6 Ma 的人类化石——“千禧人”. 为验证“千禧人”行走的姿势, Galik 等<sup>[32]</sup> 对其中的 3 件股骨标本进行了 CT 扫描和三维重建,发现“千禧人”股骨颈部骨壁的皮质厚度及形态接近现生人类,而不同于黑猩猩等猿类,“千禧人”已具有在陆地行走时已经适应习惯性两足行走,甚至已经完全两足行走.

近年来,一些学者利用 CT 技术和有限元分析软件,构建了现生灵长类骨骼系统的解剖结构和力学特性的有限元模型<sup>[33]</sup>. 在电脑上对模型进行咀嚼实验,求解在不同条件下面骨、下颌骨不同结构的受力规律,分析骨结构的改变对其抗弯强度和抗扭强度等力学特征的影响,通过模仿现生灵长类头骨的运动方式与咬合力度的关系,探讨人类进化过程

中骨骼系统的生物力学变化.

#### 2.4 木乃伊及早期人类的身体健康状况

木乃伊是考古学和病理学重要的研究材料. 1977年, CT 技术被应用到埃及木乃伊的研究中,结合 3D 复原图像,木乃伊的包裹层层地被打开,清楚地展示出木乃伊虚拟的皮肤、骨骼及内容物. 不用打开木乃伊的包裹物,借助于 CT 机,研究者们对木乃伊的性别、身高、死亡年龄、骨折、病理损伤、陪葬品、防腐制作工艺等进行探究<sup>[34]</sup>.

古代人类的生活环境艰苦,争斗造成的创伤、营养缺乏、激素异常及疾病等因素在人类骨骼的遗骸上常常会留下痕迹. 高分辨率的 CT 技术可以清晰地显示古人类化石标本骨壁的外板层、板障层和内板层等微细的解剖特征,清晰地显示出创伤或病理对骨壁的影响,有助于了解古代人群的身体状况,和追溯某些现代疾病的起源和分布.

1998年, Spoor 等<sup>[35]</sup> 为探讨在苏丹发现的距今 130 ka 的 Singa 人头骨化石的病因,对其进行了扫描. CT 图像显示其右侧颞骨的内耳骨迷路缺失,判断 Singa 人生前耳聋; 两侧顶结节的板障层明显增厚,可能患有严重的贫血. 进一步分析显示,导致 Singa 人耳聋的病源可能源自内耳血管瘤,炎症通过迷路血管感染了内耳腔,进而侵蚀至内耳小骨. Alt 等<sup>[36]</sup> 采用 CT 方法对距今 6000 a 左右女性个体的上、下颌骨进行了研究,CT 图像显示上颌骨中央两侧门齿腐败性坏死性病灶,炎症穿透髓腔,扩展到齿槽和上颌窦; 下颌骨有慢性骨髓炎伴随牙周损伤,没有愈合治疗的迹象. 推测此个体死亡的原因是由于口腔疾病引发一些复杂的感染而致.

2002年, Zollikofer 等<sup>[15]</sup> 对在法国发现的尼安德特人 St. Ce' saire 的头骨碎片进行了研究. 3D 影像显示顶穹隆部分的骨片有受创伤愈合的痕迹: 受创伤的部位骨壁较薄,外板向内呈圆滑式延伸,板障层中包含有骨板的碎块,内板部的边缘发生皱折(图 2(a)). 此损伤可能是人为使用石器等锐利的工具打击所致,并且在受伤后至少存活了几个月的时间.

2005年, Ryan 和 Milner<sup>[37]</sup> 利用 CT 技术三维重建了嵌入胫骨内部的箭头状燧石的形态特征(图 2(b)). 燧石抛射线状射入胫骨,燧石的边缘有人工

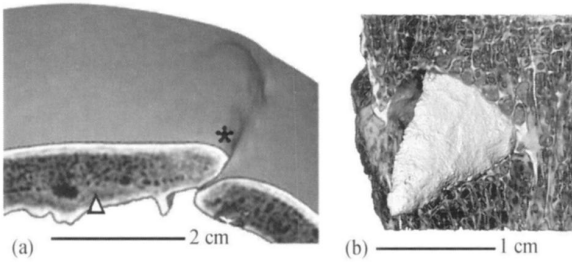


图 2 利用 CT 技术虚拟解剖早期人类骨骼内部的结构

(a) 尼安德特人 St. Ce'saire 头骨碎片  
受创伤 (\*) 和愈合 (△) 的痕迹<sup>[15]</sup>;

(b) 嵌入胫骨内部箭头状燧石的形态特征<sup>[17]</sup>

修理的痕迹, 伤口周围有愈合的现象, 推测是敌人留下的箭伤, 幸存者在受伤后存活了一定的时间.

2008 年, Shang 等<sup>[38]</sup> 利用 CT 研究了蓝田直立人额骨和顶骨的骨壁结构, 进一步证实备受争议的蓝田人古病理现象实际上是由于地层挤压腐蚀而导致的.

### 2.5 骨骼和牙齿的微细解剖结构

高分辨 CT 技术能够清晰地显示骨骼和牙齿的微细解剖结构, 是研究鼻旁窦 (图 3 (a)), 骨迷路 (图 3 (b)) 和牙齿内部解剖特征 (图 3 (c), (d)) 的极佳工具.

鼻旁窦为鼻腔周围含气的骨质腔, 按其所在颅骨的位置命名为额窦、筛窦、上颌窦和蝶窦, 了解鼻旁窦的解剖变异在临床和进化上具有非常重要的作用. 2001 年, Manzi 等<sup>[39]</sup> 采用 CT 技术对尼安德特人 Saccopastore 额窦进行了研究, 发现额窦的形

态特征与眶后结构有一定的关系. 进一步研究发现, 灵长类和人类额窦的大小与面部尺寸密切相关<sup>[40, 41]</sup>. 2003 年, Prossinger 等<sup>[42]</sup> 虚拟复原了中更新世早期人类 Steinheim, Petralona 和 Broken Hill 的上颌窦和蝶窦的形态特征, 3D 影像显示早期人类鼻旁窦的形态特征具有地区差异, 尼安德特人 Steinheim 和 Petralona 的鼻旁窦与非洲标本有地区差异: Steinheim 和 Petralona 的额窦和蝶窦向头骨两侧延伸, 额窦延伸至眶上圆枕的边缘, 两侧蝶窦被鼻骨和上颌骨分开 (图 3 (a)), 而非非洲标本 Broken Hill 的额窦和蝶窦向中央收缩, 额窦至眶上圆枕的中央, 两侧蝶窦连在了一起.

半规管是人体对自身运动状态和头在空间位置的感受器. 使用高分辨率 CT, 可以显示化石人类的内耳结构和三维复原半规管的形态特征, 为早期人类的运动方式和系统发育提供了信息. 1994 年, Spoor 等<sup>[43]</sup> 利用 CT 技术复原了南方古猿和直立人的内耳结构, 3D 影像显示南方古猿骨迷路的形态特征与现生大猿相似, 而直立人的骨迷路同现代人类类似. 尼安德特人半规管的形态特征 (图 3 (b)) 同现代人及欧洲中更新世早期人类明显不同<sup>[44, 45]</sup>. 同现代人相比, 尼安德特人的前半规管短、窄而扭转, 后半规管小而圆, 外半规管较长; 欧洲中更新世早期人类同现代人半规管多数特征相似. 半规管的解剖结构与其功能有一定关系, 推测尼安德特人和现代人头部和颈部活动的模式可能有所不同<sup>[43]</sup>.

牙齿保留有早期人类生长、发育、食物及疾病

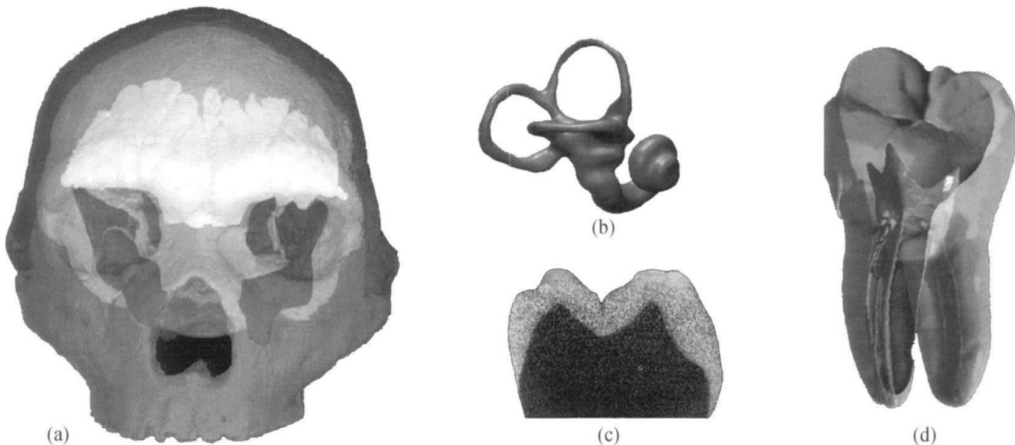


图 3 利用 CT 技术三维显示骨骼和牙齿的微细解剖结构

(a) 额窦和蝶窦<sup>[42]</sup>; (b) 骨迷路<sup>[44]</sup>; (c) 牙釉质和牙本质厚度<sup>[46]</sup>; (d) 齿槽管<sup>[47]</sup>

的信息。是研究人类系统发育、分类、古食谱和健康状况的重要标本材料。高分辨率CT技术在不破坏标本的情况下,可以清楚地显示牙釉质和牙本质的结构(图3(c)),定性和定量地对牙齿内部结构进行研究<sup>[48,49]</sup>。

齿槽管(图3(d))位于牙体的内部,传统的研究方法是对牙齿作物理切片或者利用化学药品,去除牙体外部的结构,暴露出齿根内部结构。这种有损伤牙体的方法,阻碍了对珍贵的化石标本的深入研究<sup>[47]</sup>。2006年,Plotino等<sup>[50]</sup>采用高分辨率微CT技术,在不破坏牙齿的情况下,虚拟复原了白齿齿槽管的三维解剖结构,对齿根的数目、部位、齿槽管的走向及大小进行了研究。

牙釉质厚度是鉴别猿和人系统发育的重要特征之一。1991年,Grine等<sup>[51]</sup>利用CT技术清晰地显示出化石标本牙釉质和牙本质界限,成功地对牙釉质的厚度进行了准确的测量。此后,采用CT技术测量牙釉质的厚度被应用于稀有的和灭绝的化石标本的研究中<sup>[46,52,53]</sup>。

### 3 CT技术在中国近年来的研究状况

20世纪80年代,CT设备被引进中国用于医疗检查。目前已经广泛地应用到病理、考古文化遗存、法医、航空、汽车、钢铁、石油地质、古生物和安全等各行领域中,很多相关单位已经有一定的研究和开发应用的基础。

90年代初,医用CT被应用到中国古生物的研究中。1994年,张法奎等<sup>[54]</sup>使用医用CT对杨氏中国尖齿兽头骨化石进行了扫描,观察到颅腔和鼻腔之间的筛板结构。继而这种技术被应用到古脊椎动物化石内部结构的研究上<sup>[55,56]</sup>。左权等<sup>[57]</sup>利用CT技术对恐龙蛋进行了测量,得出蛋形、蛋壳、卵蛋白、蛋黄及胚盘等结构的具体数据。周长付等<sup>[58]</sup>借助CT三维显示了鸚鵡嘴龙头骨腭面的形态结构。近年来,CT技术在我国古生物化石的研究中日益受到重视,结合计算机辅助三维图像重建技术,一些珍贵的古生物化石标本的内部形态特征被复原出来<sup>[59]</sup>。

CT技术在人体方面的应用,目前主要应用于现生人类。除了临床医疗检查、颅骨修补外,一些科研单位还开展了可视化人、颅骨面部复原、下颌

骨及牙齿的有限元分析等研究<sup>[60-63]</sup>。可视化人又称“虚拟人”,通过对尸体的从头到脚做高精度水平断层的CT扫描,采集数字高清晰图像,形成数字化虚拟逼真的人体,更加准确地描述和研究人体自身形态的结构和功能<sup>[60]</sup>。2003年,庞学利等<sup>[61]</sup>三维重建了首例中国可视化人体头颈部CT影像,清晰地显示出头面部的精细结构,如鼻子、嘴唇、耳朵、颅底圆孔、卵圆孔、棘孔、垂体、脑干、颈髓、蝶窦、鼻咽等。一些学者利用CT技术,对无名尸或考古墓葬出土人骨的头像进行复颅面复原,用于法医案件的侦破和确认历史名人的身份<sup>[62]</sup>。

同其他一些国家相比,CT在中国古人类化石方面的应用起步较晚。2004年,李天元等<sup>[64]</sup>与法国学者合作,对郧县人2号直立人头骨化石进行了扫描和三维重建,但是由于李等采用的是普通的医用CT机,虽然测出其颅容量值为 $1065\text{cm}^3$ ,受分辨率影响,其颅内模的形态特征并没有较好地展示出来。2007年,吴秀杰<sup>[65]</sup>采用高分辨率的工业CT对柳江人头骨化石进行了扫描和三维重建,获得了高精度的柳江人外表以及脑的三维图像(图4),为柳江人在人类演化上的地位提供了新的证据。

### 4 存在的问题及未来工作展望

目前,采用CT技术在中国古人类化石的应用还只是刚刚开始,很多具体的工作还没有开展起来,如对变形化石标本的矫正、对不完整部位的修补、骨腔微细解剖结构的观察、虚拟体的三维测量等等。近年来虽然在活体或现生骨骼标本方面利用CT技术作出了一些成绩,但对于石化程度很深的古生物和古人类化石标本,CT扫描和三维复原还处于摸索之中。

近些年,国内很多医院和科研机构都购置了CT扫描设备,如北京301医院、首都师范大学、中国科学院高能物理研究所、北京航空航天大学等等。这些CT设备主要用于医院病人或工业产品的检查和设计。不同于现生骨骼标本,古人类化石标本由于长期埋藏于地下,其骨壁的结构已经发生了变化。医用CT的优点是扫描的速度很快,但由于受X射线剂量的限制,对于化石标本难以清晰地分辨出标本的骨壁层、填充物层和空气层的界限。工业CT的优点是分辨率非常高,但由于其扫描速度很

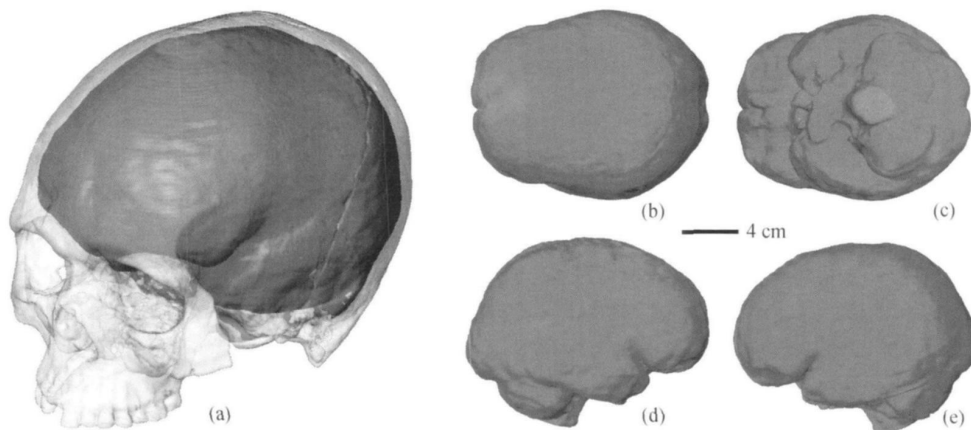


图 4 CT 扫描三维显示柳江人头骨及脑的形态特征<sup>[6]</sup>  
 (a) 头骨和脑的虚拟复原; (b) 颅内模顶面观; (c) 颅内模底面观;  
 (d) 颅内模右侧面观; (e) 颅内模左侧面观

慢, 对于珍贵的古人类标本, 人员耗时太大. 目前中国科学院古脊椎动物与古人类研究所、高能物理研究所和自动化研究所正在合作研究适合古生物研究的一套完整的古生物 CT 检测设备. 该设备具备较高的空间分辨率和密度分辨率, 兼顾化石标本体积的大小, 具有两种 X 射线源: 即扫描大尺寸化石的高强度 X 射线源与扫描小化石的微焦点 X 射线源. 此设备计划在 2008 年底投入使用.

同其他国家相比, 中国的古人类资料相对比较丰富. 自 1929 年裴文中发现周口店直立人第一个头盖骨化石以来, 在过去的 80 多年里, 已先后发现了包括元谋、蓝田、和县、汤山、郧县、大荔、金牛山、马坝、许家窑、丁村、黄龙、山顶洞、资阳等相对完整的古人类头骨化石在内的近百处古人类遗址. 虽然 CT 技术从 80 年代就已经开始应用到古人类化石的研究中, 但是对这些珍贵的中国古人类标本的研究目前还只是停留在对其头骨外表面形态特征的研究上, 其骨壁及内部的很多重要的信息还没有充分地挖掘出来. CT 技术的应用将会对中国古人类学的发展产生巨大的影响.

参 考 文 献

- 1 Röntgen CW. Über eine neue Art von Strahlen (Vorläufige Mitteilung). Sitzungsber. Physik Med Ges Würzburg, 1895: 132—141
- 2 Gorjanovic-Kramberger K. Der diluviale Mensch von Krapina in

- Kroatien. Wiesbaden: Kreidels Verlag, 1906
- 3 丁建平, 李石玲. 骨与关节损伤影像诊断图谱. 北京: 人民卫生出版社, 2006
- 4 Housfield GN. Computerized transverse axial scanning (tomography); Part I. Description of system. Brit J Radiol, 1973, 46: 1016—1022
- 5 Conroy GC, Vannier MW. Noninvasive three-dimensional computer imaging of matrix-filled fossil skulls by high-resolution computed tomography. Science, 1984, 226: 456—458
- 6 Conroy GC, Vannier MW. Endocranial volume determination of matrix-filled fossil skulls using high-resolution computed tomography. In: Tobias PV, eds. Hominid Evolution: Past, Present and Future. New York: Alan R Liss, 1985, 419—426
- 7 Conroy GC, Vannier MW, Tobias PV. Endocranial features of Australopithecus africanus revealed by 2- and 3-D computed tomography. Science, 1990, 247: 838—841
- 8 Recheis W, Macchiarelli R, Seidler H, et al. Re-evaluation of the endocranial volume of the Guattari 1 Neandertal specimen (Monte Circeo). Coll Antropol, 1999, 23(2): 397—405
- 9 Conroy GC, Weber GW, Seidler H, et al. Endocranial capacity in an early hominid cranium from Sterkfontein, South Africa. Science, 1998, 280: 1730—1731
- 10 Bruner E, Manzi G. CT-based description and phyletic evaluation of the Archaic Human calvarium from ceprano, Italy. Anat Rec, 2005, 285A: 643—658
- 11 Bruner E, Manzi G. Digital tools for the preservation of the human fossil heritage: Ceprano, Saccopastore, and other case studies. Hum Evol, 2006, 21: 33—44
- 12 李玉彬, 邱红霞, 王自强, 等. 显微动态与功能 CT 未来的 21 世纪 CT. CT 理论与应用研究, 2000, S1: 35—40

- 13 Thompson JL, Illerhaus B. A new reconstitution and analysis of the Le Moustier 1 skull and investigation of internal structure using 3-D-mCT data. *J Hum Evol*, 1998, 35: 647—665
- 14 Zollikofer C, Ponce de León MS. *Virtual Reconstruction*. Wiley-Interscience; A John Wiley & Sons, 2004
- 15 Zollikofer C, Ponce de León MS, Vandermeersch B, et al. Evidence for interpersonal violence in the St. Cé saire Neanderthal. *PNAS*, 2002, 99(9): 6444—6448
- 16 Brunet M, Guy F, Pilbeam D, et al. A new hominid from the Upper Miocene of Chad, Central Africa. *Nature*, 2002, 418: 145—151
- 17 Zollikofer C, Ponce de León MS, Lieberman D, et al. Virtual cranial reconstruction of *Sahelanthropus tchadensis*. *Nature*, 2005, 434(7): 755—759
- 18 吴秀杰, 刘武, Norton C. 颅内模——人类脑演化研究的直接证据及研究状况. *自然科学进展*, 2007, 17(6): 705—715
- 19 Kubo D, Kono R, Saso A, et al. Accuracy and precision of CT-based endocranial capacity estimations: A comparison with the conventional millet seed method and application to the Minatogawa 1 skull. *Anthropol Sci*, 2008, 116(1): 77—85
- 20 Dart RA. The Makapansgat pink breccia australopithecine skull. *Am J Phys Anthropol*, 1962, 20: 119—126
- 21 Holloway RL. Australopithecine endocranial brain evolution in the Hominoidea, and a model of hominid evolution. In: Tuttle R, eds. *The Functional and Evolutionary Biology of Primates*. Chicago, New York: Aldine-Atherton, 1972, 185—203
- 22 Falk D, Clarke R. Brief communication: New reconstruction of the taung endocranium. *Am J Phys Anthropol*, 2007, 134: 529—534
- 23 Holloway RL. Australopithecine endocranium (Taung specimen, 1924): A new volume determination. *Nature*, 1970, 168: 966—968
- 24 Balzeau A, Grimaud-Hervé D, Jacob T. Internal cranial features of the Mojokerto child fossil (East Java, Indonesia). *J Hum Evol*, 2005, 48: 535—553
- 25 Falk D, Hildebolt C, Smith K, et al. The Brain of LB1, *Homo floresiensis*. *Science*, 2005, 308: 242—245
- 26 Ruff CB. Mechanical determinants of bone form: Insights from skeletal remains. *J Musculoskelet Neuronal Interact*, 2005, 5(3): 202—212
- 27 Cracraft J. The use of functional and adaptive criteria in phylogenetic systematics. *Am Zool*, 1981, 21: 21—36
- 28 Mavropoulos A, Kiliaridis S, Bresin A, et al. Effect of different masticatory functional and mechanical demands on the structural adaptation of the mandibular alveolar bone in young growing rats. *Bone*, 2004, 35: 191—197
- 29 Daegling DJ, Grine FE. Compact bone distribution and biomechanics of early hominid mandibles. *Am J Phys Anthropol*, 1991, 86: 321—339
- 30 Fukase H. Functional significance of bone distribution in the human mandibular symphysis. *Anthropol Sci*, 2007, 115(1): 55—62
- 31 Ruff CB. Morphological adaptation to climate in modern and fossil hominids. *Am J Phys Anthropol*, 1994, 37: 65—107
- 32 Galik K, Senut B, Pickford M, et al. External and internal morphology of the BAR 1002'00 orronin tugenensis femur. *Science*, 2004, 305: 1450—1453
- 33 Strait DS, Richmond BG, Spencer MA, et al. Masticatory biomechanics and its relevance to early hominid phylogeny: An examination of palatal thickness using finite-element analysis. *J Hum Evol*, 2007, 52: 585—599
- 34 Gardner JC, Garvin G, Nelson A, et al. Paleoradiology in mummy studies: The sulman mummy project. *Can Assoc Radiol J*, 2004, 55(4): 228—234
- 35 Spoor F, Stringer C, Zonneveld F. Rare temporal bone pathology of the Singa Calvaria from Sudan. *Am J Phys Anthropol*, 1998, 107: 41—50
- 36 Alt KW, Buitrago-Téllez CH. Dental paleoradiology: Applications in paleoanthropology and paleopathology. *Can Assoc Radiol J*, 2004, 55(4): 258—263
- 37 Ryan TM, Milner GR. Osteological applications of high-resolution computed tomography: A prehistoric arrow injury. *J Archaeol Sci*, 2006, 33: 871—879
- 38 Shang H, Trinkaus E, Liu W, et al. Neurocranial abnormalities of the Gongwangling *Homo erectus* from Lantian, China. *J Archaeol Sci*, 2008, 35(9): 2589—2593
- 39 Manzi G, Bruner E, Caprasseca S, et al. CT-scanning and virtual reproduction of the Saccopastore Neanderthal crania. *Riv Antropol*, 2001, 79: 61—72
- 40 Perez Pinas, Sabate J, Carmona A, et al. Anatomical variations in the human paranasal sinus region studied by CT. *J Anat*, 2000, 197: 221—227
- 41 Rossie J, Simons EL, Gauld SC, et al. Paranasal sinus anatomy of *Aegyptopithecus*: Implications for hominoid origins. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2002, 99(12): 8454—8456
- 42 Prossinger H, Seidler H, Wicke L, et al. Electronic removal of encrustations inside the steinheim cranium reveals paranasal sinus features and deformations and provides a revised endocranial volume estimate. *Anat Rec B*, 2003, 273: 132—144
- 43 Spoor F, Wood B, Zonneveld F. Implication of early hominid labyrinthine morphology for the evolution of human bipedal locomotion. *Nature*, 1994, 369: 645—648
- 44 Spoor F, Hublin JJ, Braun M, et al. The bony labyrinth of Neanderthal. *J Hum Evol*, 2003, 44: 141—165
- 45 Hublin JJ, Spoor F, Braun M, et al. A late Neanderthal associated with Upper Palaeolithic artefacts. *Nature*, 1996, 381: 224—226



- 46 Olejniczak AJ, Grine F. Assessment of the accuracy of dental enamel thickness measurements using microfocal X-ray computed tomography. *Anat Rec A*, 2006, 288: 263—275
- 47 Vertucci FJ. Root canal anatomy of the mandibular anterior teeth. *J Am Dent Assoc*, 1974, 89(2): 369—371
- 48 Tachibana H, Matsumoto K. Applicability of X-ray computerized tomography in endodontics. *Endod Dent Traum Ato*, 1990, 6(1): 16—20
- 49 Spoor CF, Zonneveld FW, Macho GA. Linear measurements of cortical bone and dental enamel by computed tomography: Applications and problems. *Am J Phys Anthropol*, 1993, 91(4): 469—484
- 50 Plotino G, Grande NM, Pecci R, et al. Three-dimensional imaging using microcomputed tomography for studying tooth macro-morphology and Francesco Somma. *J Am Dent Assoc*, 2006, 137: 1555—1561
- 51 Grine FE. Computed tomography and the measurement of enamel thickness in extant hominoids: Implications for its paleontological application. *Palaeont Afr*, 1991, 28: 61—69
- 52 Grine FE. Geographic variation in tooth enamel thickness does not support Neandertal involvement in the ancestry of modern Europeans. *S Afr J Sci*, 2004, 100: 389—394
- 53 Olejniczak AJ, Grine FE. High resolution measurement of Neandertal tooth enamel thickness by micro-focal computed tomography. *S Afr J Sci*, 2005, 101: 219—220
- 54 张法奎, 杜湘珂, 井金萍, 等. CT 观察中国尖齿兽(*Sinoconodon youngi*)头骨化石标本的鼻部. *古脊椎动物学报*, 1994, 32(3): 195—199
- 55 杜湘珂, 张法奎, 吕君昌, 等. CT 对古脊椎动物化石标本的观察. *北京医科大学学报*, 1997, 29(1): 46—47
- 56 张法奎, 杜湘珂, 朱奇志, 等. 完美中国颌兽(*Sinognathus gracilis*)头骨化石标本的新观察. *古脊椎动物学报*, 1999, 37(4): 267—277
- 57 左 权, 请伟德. 应用医疗 CT 扫描观察恐龙蛋化石的内部结构. *古生物学报*, 1995, 34(6): 777—779
- 58 周长付, 高克勤, 杜湘珂, 等. 鸚鵡嘴龙的研究进展及 CT 应用. *北京大学学报(自然科学版)*, 2006, 42(2): 146—152
- 59 董 为, 侯新文, 房迎三, 等. 南京汤山早更新世猎豹头骨扫描数据的三维重建. *自然科学进展*, 2006, 16(9): 1146—1152
- 60 李文生, 杜文健, 宋志坚, 等. 基于网络的颅面部计算机三维重建和虚拟解剖. *解剖学杂志*, 2002, 25(3): 219—222
- 61 庞学利, 黄学全, 肖 红, 等. 首例中国可视化人体头颈部 CT 影像三维重建的初步研究. *第三军医大学学报*, 2003, 25(7): 599—601
- 62 林雪川. 内蒙古庙子沟遗址新石器时代颅骨的人像复原. *北方文物*, 2000, 4: 19—22
- 63 艾 林, 倪龙兴, 丁二锐. 下颌第一磨牙三维模型的建立. *实用医学影像杂志*, 2004, 5(6): 313—315
- 64 李天元, 艾美利, 廖美炎. 郟县人头骨化石三维复原的初步研究. *人类学学报*, 2004, 23(增刊): 12—21
- 65 吴秀杰, 刘 武, 董 为, 等. 柳江人头骨化石的 CT 扫描与脑形态特征. *科学通报*, 53(13): 1570—1573