



“高资人”化石与股骨形态变异的生物力学分析

何嘉宁^①, 房迎三^②, 何汉生^③, 吴平^④

① 北京大学考古文博学院, 北京 100871;

② 南京博物院, 南京 210016;

③ 镇江博物馆, 镇江 212003;

④ 镇江市丹徒区文广新局, 镇江 212028

E-mail: hejianing@pku.edu.cn

2011-10-18 收稿, 2011-12-09 接受

江苏省镇江市 2010 年度科技计划(SH2010001)和中国科学院战略先导科技专项(XDA05130102)资助

摘要 运用生物力学方法对 1980 年在江苏镇江高资镇采集的 2 件完全石化的人类股骨进行分析, 并在常规形态观测和加速器质谱 ^{14}C 测年的基础上对更新世人类化石及全新世现代人股骨形态的变异进行讨论. 测年数据显示, “高资人”股骨可能属于全新世现代智人, 但基于 CT 扫描数据计算出的骨干抗压抗拉强度、抗弯强度及其他形态特征都呈现某些较全新世现代人更古老的特征. 对比分析表明, 人类股骨形态及测量值因其功能状况等原因具有相当大的变异, 股骨形态特征不能作为判断化石系统发育地位的最关键证据. 股骨生物力学参数是其功能状况的直接反映, 在人类不同演化阶段因运动行为模式差异, 其相对大小在不同人群存在更加明显分异, 因而生物力学分析在长骨功能状况研究上具有很大应用价值. 化石石化程度不是判断其年代的可靠标准.

关键词

“高资人”股骨化石
生物力学分析
形态变异
加速器质谱 ^{14}C 测年
现代人
CT 扫描

长骨是体质人类学研究重要内容之一. 从 Weidenreich^[1]对周口店直立人肢骨的系统观测开始, 学术界就通过长骨形态、长度、不同部位骨干和髓腔大小的观测及对比来探讨人类长骨演化的过程、原因和人群差异. 20 世纪 90 年代以来, 相关研究开始注重于从生理机能角度探讨长骨功能状况与古人行为模式、生存气候环境的关系. 对古人类肢体比例研究、长骨粗壮度分析以及长骨形态性别差异的探讨等^[2-4], 都为了解人类演化提供了重要信息. 尤其是 CT 扫描、三维激光扫描、几何形态分析等新手段的运用, 进一步扩展了相关研究的深度和广度. 骨骼生物力学分析就是其中得到较广泛应用的重要研究方法.

骨骼生物力学探讨骨骼性能和结构随力学环境而改变的机理, 是了解古人类骨骼肌肉系统生理功能状况非常重要的研究手段, 尤其是股骨兼有承重

和运动多种功能而最受关注. 相比之下生物力学在国内人类演化研究中的应用几乎为空白. 相对于头骨及牙齿的研究对长骨的关注度仍相对较低, 由于长骨化石更为稀少在中国这一情况尤其明显. 这些都限制了对东亚地区古人类肢骨演化的认识. 1980 年, 考古工作者在镇江市高资镇采集到 2 件人类股骨化石, 尽管 2 件标本脱离了原生地层, 但由于人类化石的稀缺性, 任何股骨化石都是了解古人长骨功能状况的重要材料. 本文在对“高资人”股骨进行形态描述的基础上, 通过 CT 扫描观测髓腔形态, 尝试采用生物力学分析手段对包括“高资人”在内的人类股骨形态变异状况进行定量分析, 探讨股骨形态变异在研究人类运动行为模式演化上的意义. 同时为确定“高资人”股骨的绝对年代和系统发育地位, 对标本本身进行了加速器质谱 ^{14}C 测年, 并对脱层化石年代判定的相关问题进行讨论.

英文引用格式: He J N, Fang Y S, He H S, et al. Biochemical analysis and morphological variation of Gaozi human fossil femurs (in Chinese). Chin Sci Bull(Chin Ver), 2012, 57: 830–838, doi: 10.1360/972011-1960

1 材料与方法

(i) 研究材料. “高资人”股骨 2 件, 1 号股骨编号 TW1-01, 2 号股骨编号 TW1-02. 其他分析材料包括直立人、东亚晚期智人(含更新世-全新世过渡阶段化石)、尼安德特人、Qafzeh-Skhul 解剖学上的现代人、欧洲旧石器晚期早段(EUP)晚期智人以及全新世现代人(表 1). 相关数据多引自有关文献, 部分现代华北人以及东胡林人数据是从标本上直接测得; 一些材料(周口店直立人、山顶洞人、萨拉乌苏人和青山头人等)的生物力学参数是根据原文发表的股骨断面形态图计算获得.

(ii) 研究方法. 对高资股骨进行形态描述与测量比较, 并对化石本身进行加速器质谱 ^{14}C 测年. 常规测量项目包括骨干上部、中上部、中部和中下部的横径和纵径, 股骨扁平指数(platymeric index), 股骨嵴指数(pilastric index)和股骨干最小周长. 骨干上部、中上部、中部及中下部的位置, 分别相当于股骨从远端向近端生物力学长度 80%, 65%, 50%, 35%所处的位置. 生物力学长度依 Ruff 等人^[21]的定义, 是与骨干长轴平行的内、外侧股骨髁到股骨颈上缘距离的平均值. 从生物力学对比分析的角度选择观察不同人群股骨干中部及中上部横、纵径分布情况.

此外还对不同人类群体股骨生物力学参数进行了比较. 由于“高资人”股骨只保留有部分骨干, 其生物力学特征主要体现在骨干横断面的大小和几何形状上. 为获得不同部位骨干断面的形态, 在北京大学校医院对“高资人”股骨及少量现代华北人股骨进行了 CT 扫描. CT 型号为 SIEMENS Sensation 64, 扫描参数为电压 120 V, 电流 77 mA, 层厚 0.6 mm. 通过 CT 扫描影像绘出不同部位骨干横断面的等比图形,

再使用 AutoCAD 等软件计算截面相关生物力学参数. 所测参数包括骨干横截面总面积、髓腔面积、密质骨面积, 不同方向的截面惯性矩(second moment of area)和极惯性矩(polar moment of area). 计算密质骨指数(cortical index)以反映密质骨和髓腔大小相对关系, 计算方法为: 密质骨面积/截面总面积 $\times 100$.

在这些生物力学参数中, 密质骨截面面积与骨骼可承受压缩和拉伸应力的强度呈正比, 反映了股骨的抗压和抗拉强度. 截面惯性矩反映了截面对不同方向弯曲载荷负载能力的强弱, 可以体现抗弯强度的大小. 在弯曲载荷影响下, 骨的强度受截面面积和中性轴周围骨组织分布的影响. 截面面积越大则骨的刚度和强度越大, 截面形状也同时影响到骨骼力学特征. 截面惯性矩是同时反映这两个因素的一个参数. 其测量包括最大和最小截面惯性矩 $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$, 以及横向和纵向截面惯性矩 I_y 和 I_x . 其中的 I_x 和 I_y 分别反映了骨骼对前后向和内外向弯曲载荷承受能力的大小. 在扭转载荷影响下, 骨的强度同样受截面面积和中性轴周围骨组织分布的影响, 极惯性矩即是反映截面对扭转载荷承受力大小的一个参数, 以 J 或 I_p 表示, $J=I_{\max}+I_{\min}$. 对这些生物力学参数在不同人类群体中的表现情况进行比较分析.

2 “高资人”股骨化石

2.1 化石的发现

江苏省镇江市位于长江下游的南岸. 市区西南部为海拔高度 200~300 m 的低山, 属宁镇山脉东段的延续部分. 山体由志留系、泥盆系砂、页岩和石炭系、二叠系、三叠系的碳酸盐岩构成, 石灰岩非常发育, 建有多处采石场和石灰石厂, 在石料开采过程中不时暴露出脊椎动物化石.

1980 年 3 月, 隶属镇江市的原丹徒县文教局严飞等进行文物调查时在本县高资公社(现丹徒区高资镇, $32^{\circ}10'08''\text{N}$, $119^{\circ}18'18''\text{E}$, 海拔约 6 m)发现 2 件人类肢骨化石(图 1)^[22]. 2 件化石均采集自镇工商行政管理局门前开挖的水塘埂边灰绿色粉砂质亚黏土中, 也有出自筑路开挖的土石坑内^[23]. 发现人推测该地不是化石的原产地, 很可能是从附近采石场搬运而来. 有些研究者注意到“两段股骨化石比较粗壮, 股骨脊较宽, 骨壁较厚”等特点, 认为与北京猿人有相近的性状, 地质时代可能为晚更新世甚至更早^[24],

表 1 研究材料

研究材料	数量	材料来源	数据来源
“高资人”	2	江苏镇江	本文
直立人	7	周口店、爪哇	[1]及本文
尼安德特人	15	欧洲、西亚	[1,5~8]
Qafzeh-Skhul	12	西亚	[5~7]
欧洲 EUP 晚期智人	27	欧洲	[5~10]
东亚晚期智人	9	山顶洞、田园洞、港川、柳江、萨拉乌苏、青山头、东胡林、下草湾	[1,11~17]及本文
全新世现代人	33	亚洲、非洲、欧洲、美洲、大洋洲	[1,15,17~20]及本文

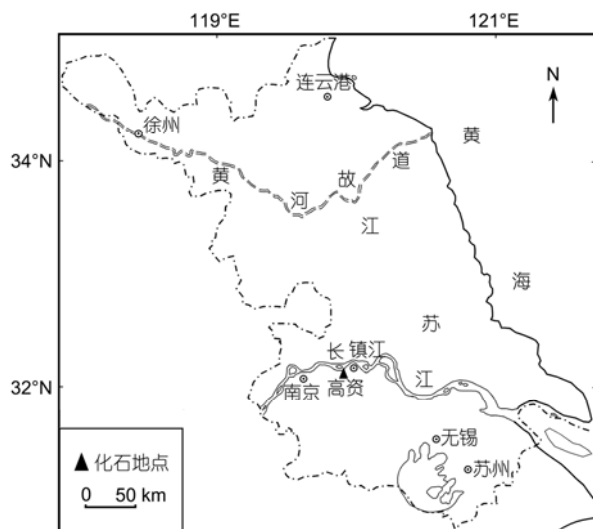


图 1 “高资人”股骨发现地点示意图

或者为更新世中期, 绝对年代距今 20~40 万年^[25].

2.2 保存情况

2 根股骨均只保留部分骨干, 表面有轻度胶结的薄层灰色胶结物. 剔除胶结物后股骨呈灰白色, 石化程度较深. 两股骨石化程度、颜色及表面胶结物质地颜色完全一致. 股骨表面局部有轻微的侵蚀, 但对骨骼表面形态观察和测量影响很小(图 2).

2.3 形态特征及比较

“高资人”1 号标本是 1 件左侧股骨, 保留有骨干的中上部分, 残长 240 mm. 近端断面位于小转子水平, 密质骨在内侧壁最厚, 在后壁较薄; 密质骨和髓腔之间为薄厚不等的松质骨; 髓腔较为宽大. 远端断

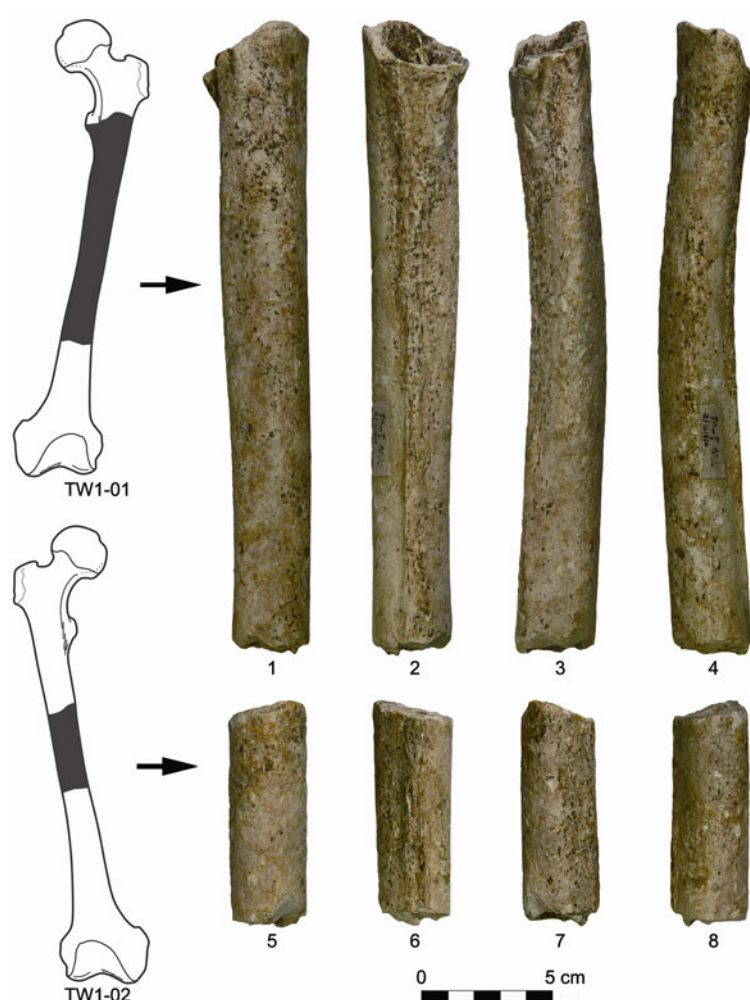


图 2 “高资人”股骨化石及其解剖位置

1~4, “高资人”1 号股骨(TW-01), 前面观, 后面观, 内侧面观, 外侧面观; 5~8, “高资人”2 号股骨(TW-02), 前面观, 后面观, 内侧面观, 外侧面观

面骨壁厚薄不一，髓腔呈不规则形。

骨干保留有上 2/3 的部分。前面观上部宽于下部，这与骨干近端 1/2 内侧面纵行脊状膨隆有关。该特征的存在使骨干上端内侧面呈现为棱形的纵脊，而非像很多全新世现代人那样表现为平缓的圆柱形表面。该纵脊的上部与其后面的小转子之间有明显的纵沟。这样的特征可见于尼安德特人或更古老类型的人类；在现代人该特征减弱甚至消失，但在某些欧洲旧石器晚期早段晚期智人如克罗马农人股骨上仍较明显存在^[26,27]。该纵脊状膨隆使“高资人”骨干上部截面轮廓呈相对扁平的形态。扁平的骨干上部在欧洲旧石器晚期早段晚期智人中尤为明显，但这与较发达臀肌粗隆相关的骨干上端向外侧膨隆有关^[6,7]，而与“高资人”纵脊状膨隆位于上端内侧不同。侧面观可见股骨干存在较明显的弯曲；后面观股骨嵴较为明显。在相当于完整骨干中部稍偏上和稍偏下的位置各有 1 个开口向下的滋养孔。滋养孔位于股骨嵴内侧唇上。

“高资人”2 号标本残长 83 mm，为右侧股骨骨干中部的一段。骨干的近端 1/3 及远端 1/2 缺失。近端断面密质骨较厚，髓腔呈椭圆形。远端断面大致处于骨干中部的的位置，髓腔呈不规则椭圆形。由于保存长度有限，侧面观察不到明显的曲度。后表面可见较发达的股骨嵴。在相当于完整股骨的中部稍偏上的位置，在股骨嵴内侧唇上可见一个开口向下的较大滋养孔。根据 CT 扫描数据所绘两股骨不同部位断面形态见图 3。

“高资人”股骨形态与其他材料的对比情况见表 2。不同人类群体股骨形态都存在较大变异，“高资人”股骨形态特征并未表现出与哪一类群体完全一致。

2.4 “高资人”股骨的测量

“高资人”股骨各项测量值如表 3 和 4 所示。“高资

人”的股骨嵴指数略大于 100，其骨干中部横断面形状近圆形。股骨扁平指数显示“高资人”股骨干上部较为扁平。密质骨指数表明密质骨面积占截面总面积比例从骨干中上部到中下部有逐渐减小的趋势，即髓腔占比逐渐增大；截面密质骨面积从骨干上部到下部也逐渐减少。

2.5 年代测定

人骨化石由北京大学考古文博学院科技考古与文物保护实验室进行加速器质谱碳十四(AMS ¹⁴C)测年。测试方法是首先对“高资人”股骨样本进行前处理，提取其中所包含的骨胶原。然后对获取的胶原蛋白进行加速器质谱年代测定。¹⁴C 树轮校正所用曲线为 IntCal04^[28]，所用程序为 OxCal v3.10. 2 件股骨标

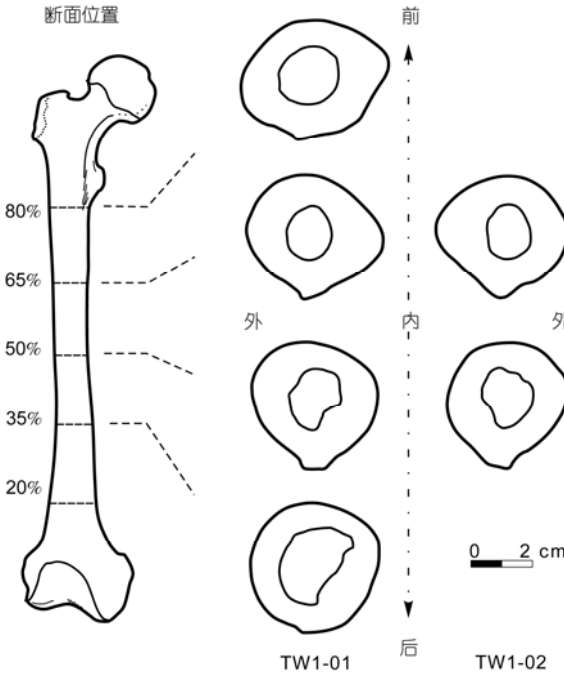


图 3 “高资人”股骨骨干断面形态

表 2 “高资人”股骨形态比较

	股骨嵴	骨干上部 断面扁平度	骨干近端		髓腔相对大小	绝对大小
			内侧纵脊	外侧膨隆		
“高资人”	较明显	扁平	明显	弱	略偏小	偏大
直立人	弱	明显扁平	变异大	变异大	很小	中等
尼安德特人	弱	略扁平	可见	中等~弱	较小	偏大，变异大
欧洲 EUP 晚期智人	发达	明显扁平	变异大	明显	略偏小	偏大，变异大
Qafzeh-Skhul	发达	略扁平	多较弱	变异大	略偏小	偏大，变异大
东亚晚期智人	中等~发达	变异大	变异大	变异大	略偏小	变异大
全新世现代人	弱~较明显	扁平	弱或无	常较弱	较大	偏小，变异大

表 3 “高资人”股骨测量值

测量项目	“高资人”1 号 (TW1-01)	“高资人”2 号 (TW1-02)
骨干上部横径(mm)	35.4	—
骨干上部纵径(mm)	27.3	—
股骨扁平指数	77.1	—
骨干中上部横径(mm)	32.0	30.8
骨干中上部纵径(mm)	28.7	28.4
骨干最小宽(mm)	29.1	28.1
骨干中部横径(mm)	29.6	28.5
骨干中部纵径(mm)	29.9	29.5
股骨嵴指数	101.0	103.5
骨干中下部横径(mm)	30.6	—
骨干中下部纵径(mm)	29.8	—
骨干最小周长(mm)	93.0	90.0

本中只有 1 件获得年代结果(表 5). TW1-02 号股骨样品由于可提取胶原蛋白数量很少, 经 2 次测试均未能获得可靠年代数据. 年代结果表明, “高资人”股骨很可能属于全新世现代智人.

“高资人”股骨目前只进行了 ^{14}C 测年. 由于股骨形态呈现出一定原始特征, 此测年数据还需要得到其他方法验证.

3 测量与生物力学比较分析

3.1 股骨干的横纵径分布

以全新世现代人群数据计算而得的主轴回归

(reduced major axis regression)直线为参照, 观察各化石材料及“高资人”在骨干中部和上部横、纵径二维分布图上的表现(图 4).

从横、纵径的绝对值看, 无论在骨干中部还是上部, 化石人类整体上都具有比全新世现代人群更大的数值. “高资人”股骨横纵径大于多数全新世现代人群平均值, 而与很多晚更新世化石人类相当.

在骨干横、纵径相对关系的分布上, 不同对比材料既存在相当程度的重叠也有一定的区分. 在股骨干上部(转子下水平), 多数的欧洲旧石器晚期早段晚期智人, 东亚晚期智人及东亚直立人化石具有相对于全新世现代人群更为扁平的骨干上部断面轮廓. Qafzeh-Skhul 解剖学上的现代人以及多数的尼安德特人则具有相对略圆的上部断面轮廓. “高资人”数据分布在全新世现代人回归直线之下, 上部断面轮廓相对扁平.

在股骨干中部横、纵径相对关系的分布上, 不同群体间的分异相对更明显. 直立人和多数尼安德特人的骨干中部相对更扁, 具有较小的嵴指数; 而多数 Qafzeh-Skhul 解剖学上的现代人、欧洲旧石器晚期早段晚期智人化石的股骨嵴非常发达显著, 嵴指数较大. 东亚晚期智人分布较为分散. “高资人”股骨干中部断面轮廓较圆, 扁平程度弱于直立人.

比较可知, 包括全新世现代人在内的不同人类群体在股骨横纵径的绝对值上都有较大变异和分布范围

表 4 “高资人”股骨干各部位截面生物力学参数

截面位置	“高资人”1 号(TW1-01)				“高资人”2 号(TW1-02)	
	35%	50%	65%	80%	50%	65%
横截面总面积 (mm^2)	710	641	646	705	602	620
髓腔面积 (mm^2)	205	122	103	151	120	104
密质骨面积 (mm^2)	505	519	543	554	482	516
$I_{\min}$ (mm^4)	35997	28740	27859	29579	25385	26714
$I_{\max}$ (mm^4)	36531	34921	38167	48291	30486	33377
I_x (mm^4)	35997	31227	28795	30825	28610	26828
I_y (mm^4)	36530	32434	37231	47045	27261	33263
J (mm^4)	72527	63661	66026	77870	55871	60091
$I_{\max}/I_{\min}$	1.01	1.22	1.37	1.63	1.20	1.25
I_x/I_y	0.99	0.96	0.77	0.66	1.05	0.81
密质骨指数	71.1	81.0	84.1	78.6	80.1	83.2

表 5 “高资人”股骨加速器质谱 ^{14}C 法年代测定结果

实验室编号	样品	样品原编号	^{14}C 年代(a BP)	树轮校正后年代	
				1 σ (68.2%)	2 σ (95.4%)
BA101530	人骨	TW1-01	1364 $\pm$ 30	640~675AD (68.2%)	610~670 AD (93.0%) 740~770 AD (2.4%)

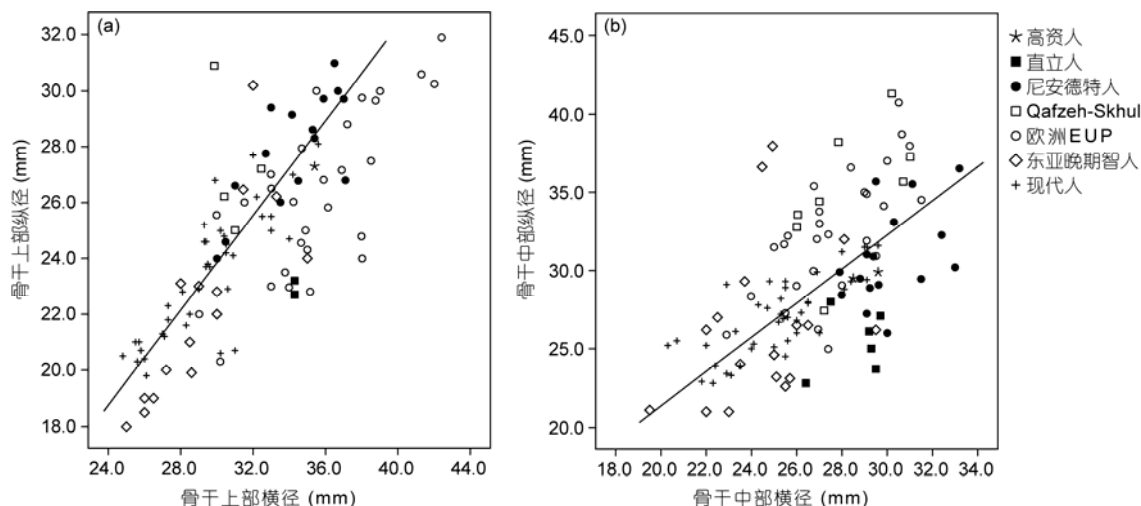


图4 股骨骨干横纵径的比较

(a) 骨干上部(转子下水平); (b) 骨干中部. 图中的直线是依据全新世现代人群数据通过主轴回归分析计算而得的回归直线, 下同

的重叠, 但不同群体在股骨指数分布上有一定分异.

3.2 股骨干中部断面的密质骨和髓腔大小分布

Weidenreich^[1]在研究周口店直立人长骨化石时, 使用髓腔横径指数和纵径指数来判断髓腔的相对大小. 现在通过 CT 扫描技术可以直接计算骨干断面面积, 更精确地反映密质骨和髓腔面积相对大小关系. 在骨干中部水平, 尼安德特人与直立人标本具有相对较大的密质骨面积和更小的髓腔(图 5), 表明其股骨具有相对较大的抗压抗拉强度. Qafzeh-Skhul 解剖学上的现代人以及欧洲旧石器晚期早段晚期智人与全新世现代人有较大的重叠范围. 从绝对大小来看, 虽有明显重合但整体上化石人类股骨截面面积较大,

抗拉抗压强度明显大于全新世现代人. “高资人”骨干中部截面以及密质骨面积绝对和相对值大于多数的全新世现代人群均值, 与各化石人类类似更为接近. 在反映骨干抗压抗拉强度的截面面积上, 不同人类群体间同样有较大变异和分布范围的重叠, 但密质骨面积相对大小对尼安德特人尤其是直立人有较好的区分.

3.3 股骨干中部断面的抗弯强度分布

在反映股骨干前后向和内外向弯曲载荷承受力的骨干中部截面惯性矩 I_x 和 I_y 分布上, 不同群体分布范围虽仍有重叠, 但区分却相对更为明显(图 6), 尼安德特人和直立人具有相对较高的横向抗弯强度 I_y , 而 Qafzeh-Skhul 解剖学上的现代人和欧洲旧石器晚期早段晚期智人具有相对更大的纵向抗弯强度 I_x , 二

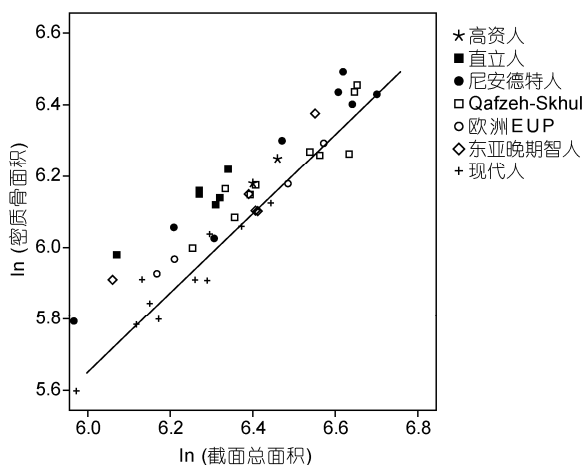


图5 股骨骨干中部截面面积比较

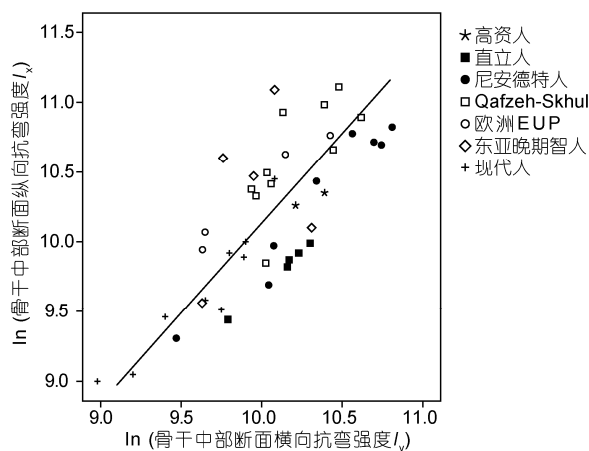


图6 股骨骨干中部断面抗弯强度比较(据文献[6]修改)

者有明显的区分. 东亚晚期智人化石分布范围较为分散. “高资人”股骨抗弯强度的绝对值大于对比之全新世现代人, 在横、纵向抗弯强度相对关系上似介于更新世古老类型人类化石(如直立人)与较现代人类化石(如 Qafzeh-Skhul 解剖学上现代人和欧洲 EUP 晚期智人)之间.

4 讨论和结论

4.1 “高资人”股骨化石的性质及脱层化石年代判定

经调查, “高资人”股骨可能出自高资镇南部的采石场. 原发现者认为 2 件股骨分属 2 个个体. 由于 2 件股骨采集自同一地点, 且分别为左侧(TW1-01)和右侧(TW1-02); 骨表面以及胶结物的颜色、质地完全相同; 石化程度相当; 骨骼大小、形态非常接近, 因而推测 2 件标本很可能属同一个体. 股骨较为粗壮, 从发育情况判断应属成年个体. 根据人骨加速器质谱 ^{14}C 测年的结果以及文中多项分析, 该股骨标本有可能属于全新世现代智人.

“高资人”股骨的测年结果再次表明, 骨骼石化速度受埋藏环境影响很大, 石化程度不是判断骨骼年代的可靠依据, 科学的地层或对脱层化石本身直接进行绝对年代测定才是直接优先的证据. 有些曾被认为属于更新世的人类化石已经通过对化石直接测年证实属于全新世^[29,30]. 我国还有一些脱离地层或产出层位存在疑问的人类化石材料, 它们的年代同样需要重新检视. 另一方面随着测年技术不断改进, 也可以深化提高我们对已发现古人类化石的认识, 使我国人类演化框架研究建立在更加坚实的基础上.

4.2 人类股骨形态变异

“高资人”2 件股骨较为粗壮. 在整体粗壮度、截面积及相关生物力学参数上, “高资人”股骨都具有相对较高的绝对数值, 大于多数现代人群的平均值而与很多更新世化石对比材料更为相近. 加之某些古老形态特征, “高资人”股骨总体体现偏古老的特点. 由于 ^{14}C 测年结果表明“高资人”可能属于全新世现代智人, 测年结果与其形态特征并不完全相符. 这为了解人类股骨形态变异及其功能状况的演化关系提供了有益启示.

首先, 比较分析表明各化石人类和全新世现代人在股骨绝对测值分布上有相当大范围的重叠. 股骨指数尤其是生物力学参数的相对关系对不同人类群体的分异性虽明显好于绝对测值, 但也存在分布重叠现象. 这说明人类股骨形态存在很大变异.

其次, 变异的存在与人类股骨功能状况的差异存在密切联系. 长骨结构特征与其运动样式或功能状态之间的关联性已被许多研究所证实^[31-35]. 环境和气候可以通过对体重、肢体比例以及对资源分布和数量的影响作用于人类获取资源的行为方式, 最终引起长骨粗壮度和形状的变化^[3,4,36]. 功能状况对股骨形态的影响不但体现在各项绝对测值, 更反映在股骨指数及不同方向抗弯强度的相对关系上.

最后, 股骨中部断面形态与其功能载荷相关, 尤其与大腿前群肌肉股四头肌和后群肌肉腓绳肌收缩力所导致的股骨前后向弯曲载荷有关. 有研究表明股骨粗壮度在晚更新世只有细微变化, 与此同时股骨干前后向抗弯强度却有显著改变^[5]. Qafzeh-Skhul 解剖学上的现代人和欧洲旧石器晚期早段晚期智人股骨干中部断面形状体现出较强的前后向抗弯能力. 经旧石器时代晚期晚段再到新石器时代, 股骨前后向抗弯强度的相对大小随时间稳步减低, 反映了大腿前后群肌肉功能活跃性的下降和人类活动度的逐渐降低, 暗示了与新石器时代定居等行为相适应的体质特征的逐步形成^[4,36,37]. “高资人”在股骨指数以及生物力学参数相对关系上表现出与 Qafzeh-Skhul 解剖学上的现代人和欧洲旧石器晚期早段晚期智人明显不同的特征, 而与部分东亚晚期智人、全新世现代人以及尼安德特人或直立人相近, 反映后者人类群体在下肢功能状态和运动模式或活动度上的某些相近性. “高资人”股骨指数及抗弯强度的相对大小符合现代人活动度减弱的特点. 由于长骨形态受环境、功能的影响很大, 具有高度可塑性. 长骨形态即使在一生中也会随年龄及其功能状况不断发生变化, 因而现代人股骨也存在高度变异. “高资人”股骨保留的那些偏古老形态特征正是现代人类股骨形态高度变异性的一个体现.

基于以上分析判断, 股骨形态和绝对测量值无法准确区分不同种类的化石人类. 横向和纵向截面惯性矩等生物力学参数的相对大小对不同人类群体的分异性明显要好于绝对测量值, 应与人类行为运动模式在不同演化阶段可能存在的差异有关. 然而

由于这些生物力学参数受长骨功能状况和环境因素影响很大, 受遗传因素影响相对较小, 也不宜作为判定化石系统发育地位的最关键证据。

4.3 长骨的生物力学分析方法

过去二三十年以来, 长骨生物力学分析在古人类学研究领域中得到较多运用。CT 扫描等技术手段的普及和相关软件迅速发展促进了此类研究的开展。生物力学分析可反映出传统线性测量无法获取的信息: 如对骨干断面面积的测量可以直接反映出骨干

抗压、抗拉强度; 截面惯性矩不但与截面大小有关, 还包含有截面的形状信息。这种分析方法获得的数据更精确, 更能直接反映长骨功能状况。结合了身高体重等因素的生物力学分析可以了解古人类运动行为方式的演化提供更加丰富的信息, 在长骨功能研究上具有很大潜在价值。通过本文比较分析可以发现, 股骨生物力学参数对不同人群的分异性要明显好于传统测量项目, 充分体现了生物力学研究手段的优越性和在体质人类学研究领域的良好应用前景。

致谢 衷心感谢镇江市历史文化名城研究会、镇江市和丹徒区文广新局、镇江博物馆等有关部门大力支持并提供人类化石标本, 保证了研究工作顺利进行。中国科学院古脊椎动物与古人类研究所刘武研究员和吴秀杰研究员对本文给予诸多建议, 谨致谢忱。

参考文献

- 1 Weidenreich F. The extremity bones of *Sinanthropus pekinensis*. *Paleontol Sin (NS D)*, 1941, 5: 1–150
- 2 Walker A, Leakey R. The postcranial bones. In: Walker A, Leakey R, eds. *The Nariokotome Homo erectus Skeleton*. Cambridge: Harvard University Press, 1993. 95–160
- 3 Pearson O M. Activity, climate, and postcranial robusticity: Implications for modern human origins and scenarios of adaptive change. *Curr Anthropol*, 2000, 41: 569–607
- 4 Holt B M. Mobility in Upper Paleolithic and Mesolithic Europe: Evidence from the lower limb. *Am J Phys Anthropol*, 2003, 122: 200–215
- 5 Trinkaus E, Churchill S E. Diaphyseal cross-sectional geometry of near eastern middle paleolithic humans: The femur. *J Archaeol Sci*, 1999, 26: 409–424
- 6 Trinkaus E. The lower limb remains. In: Trinkaus E, Svoboda J, eds. *Early Modern Human Evolution in Central Europe: The People of Dolní Věstonice and Pavlov*. New York: Oxford University Press, 2006. 380–418
- 7 Trinkaus E, Smith F H, Stockton T C, et al. The human postcranial remains from Mladeč. In: Teschler-Nicola M, ed. *Early Modern Humans at the Moravian Gate: The Mladeč Caves and Their Remains*. Austria: Springer-Verlag/Wien, 2006. 385–446
- 8 Beauval C, Maureille B, Lacrampe-Cuyaubère F, et al. A late Neandertal femur from Les Rochers-de-Villeneuve, France. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2005, 102: 7085–7090
- 9 Mednikova M, Trinkaus E. Femoral midshaft diaphyseal cross-sectional geometry of the Sunghir 1 and 4 gravettian human remains. *Anthropol*, 2001, 39: 103–109
- 10 Teschler-Nicola M, Trinkaus E. Human remains from the Austrian Gravettian: The Willendorf femoral diaphysis and mandibular symphysis. *J Hum Evol*, 2001, 40: 451–465
- 11 吴汝康, 贾兰坡. 下草湾的人类股骨化石. *古生物学报*, 1955, 3: 67–68
- 12 吴汝康. 河套人类顶骨和股骨化石. *古脊椎动物学报*, 1958, 2: 208–112
- 13 吴汝康. 广西柳江发现的人类化石. *古脊椎动物与古人类*, 1959, 1: 97–104
- 14 吴新智. 周口店山顶洞人化石的研究. *古脊椎动物与古人类*. 1961, 3: 181–203
- 15 Baba H, Endo B. Postcranial skeleton of the Minatogawa Man. In: Suzuki H, Hanihara K, eds. *The Minatogawa Man: The Upper Pleistocene Man from the Island of Okinawa*, The University of Tokyo Bulletin, No. 19. Tokyo: University of Tokyo Press, 1982. 61–196
- 16 尤玉柱, 李毅, 李春田. 吉林前郭查干泡发现的人类化石与古生态环境. *史前研究*, 1984, 1: 70–74
- 17 Shang H, Trinkaus E. *The Early Modern Human from Tianyuan Cave, China*. College Station: Texas A&M University Press, 2010. 132–166
- 18 颜闾. 大汶口新石器时代人骨的研究报告. *考古学报*, 1972, 1: 91–122
- 19 颜闾. 西夏侯新石器时代人骨的研究报告. *考古学报*, 1973, 2: 91–126

- 20 Grine F E, Jungers W L, Tobias P V, et al. Fossil *Homo* femur from Berg Aukas, northern Namibia. *Am J Phys Anthropol*, 1995, 97: 151–185
- 21 Ruff C B, Hayes W C. Cross-sectional geometry of Pecos Pueblo femora and tibia: A biomechanical investigation. I. Method and general patterns of variation. *Am J Phys Anthropol*, 1983, 60: 359–381
- 22 严飞, 时裕承, 戴志恭. 丹徒县高资的人类股骨化石. 见: 江苏省哲学社会科学联合会 1980 年年会论文选(考古学分册), 1981. 53–54
- 23 戴志恭. 由汤山溶洞发现古人类化石想起的. *镇江文物*, 1993, 3: 18–19
- 24 张祖方, 李文明. 江苏省古人类和旧石器时代的考古工作. *南京博物院集刊*, 1980, 2: 1–6
- 25 镇江博物馆考古部. 建馆三十年来的考古工作. *东南文化*, 1988, 5: 159–167
- 26 Trinkaus E. The evolution of the hominid femoral diaphysis during the upper Pleistocene in Europe and Near East. *Z Morph Anthropol*, 1976, 67: 291–319
- 27 Trinkaus E. Does KNM-ER 1481A establish *Homo erectus* at 2.0 myr BP? *Am J Phys Anthropol*, 1984, 64: 137–139
- 28 Reimer P J, Baillie M G L, Bard E, et al. Intcal04 terrestrial radiocarbon age calibration. *Radiocarb*, 2004, 46: 1029–1058
- 29 尚虹, 卫奇, 吴小红. 关于萨拉乌苏遗址地层及人类化石年代的问题. *人类学学报*, 2006, 25: 82–86
- 30 Keates S G, Hodgins G W L, Kuzmin Y V, et al. First direct dating of a presumed Pleistocene hominid from China: AMS radiocarbon age of a femur from the Ordos Plateau. *J Hum Evol*, 2007, 53: 1–5
- 31 Ruff C B. Sexual dimorphism in human lower limb bone structure: Relationship to subsistence strategy and sexual division of labor. *J Hum Evol*, 1987, 16: 391–416
- 32 Larsen C S. Biological change in human populations with agriculture. *Annu Rev Anthropol*, 1995, 24: 185–213
- 33 Larsen C S. Bioarchaeology: Interpreting Behavior from the Human Skeleton. New York: Cambridge University Press, 1997. 195–225
- 34 Stock J, Pfeiffer S. Linking structural variability in long bone diaphyses to habitual behaviors: Foragers from the southern African Later Stone Age and the Andaman Islands. *Am J Phys Anthropol*, 2001, 115: 337–348
- 35 Stock J, Pfeiffer S. Long bone robusticity and subsistence behaviour among Later Stone Age foragers of the forest and fynbos biomes of South Africa. *J Archaeol Sci*, 2004, 31: 999–1013
- 36 Wescott D J. Effect of mobility on femur midshaft external shape and robusticity. *Am J Phys Anthropol*, 2006, 130: 201–213
- 37 Bridges P S. Skeletal biology and behavior in ancient humans. *Evol Anthropol*, 1995, 4: 112–120

Biochemical analysis and morphological variation of Gaozi human fossil femurs

HE JiaNing¹, FANG YingSan², HE HanSheng³ & WU Ping⁴

¹School of Archaeology and Museology, Peking University, Beijing 100871, China;

²Nanjing Museum, Nanjing 210016, China;

³Zhenjiang Museum, Zhenjiang 212003, China;

⁴Dantu Municipal Bureau of Culture, Radio, TV, Film, Press and Publication, Zhenjiang 212028, China

A biomechanical method was used to analyze two incomplete heavily fossilized human femur fossils collected from Gaozi, Jiangsu Province, China. Direct AMS ¹⁴C reveal the fossils were ca. 1350 years old. Morphological and biomechanical comparisons were made to examine the variation of morphology from the human femurs. When these Gaozi femurs were compared in cross sections, they showed robust diameters, cortical bone areas and anti-bending strength. Our measurements as well as some morphological characters suggest the fossils were more primitive than most modern Holocene populations. This indicates that the morphology and measurements of *Homo sapiens* femurs have a great range of variation and should not be used as key evidence for phylogenetic analysis. The morphological differentiation of human femurs is better represented from relative biomechanical parameters, which may indicate functional differences in different kinds of human fossils. Biomechanical analysis provides direct information of long bone functional status that may have great value in functional studies of postcranial bones. In addition, we found that the degree of fossilization is not a good indicator of age. In China, some fossils were not found *in situ* and have no direct dating result, therefore the creditability of their presumed age should be carefully considered.

Gaozi human femur fossils, biomechanical analysis, morphological variation, AMS ¹⁴C dating, modern *H. sapiens*, CT scan

doi: 10.1360/972011-1960