

人类股骨断面面积与形状的不对称性 ——基于三维激光扫描的形态测量分析

魏偏偏^{1,2}, 邢松¹

1. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 中国科学院脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 北京 100044;
2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 人类股骨横断面面积、形状及其左右侧差异记载的人类演化、人群差异及生活动态的重要信息一直是古人类学研究所关注。多年来, 对股骨断面的研究通常采用破坏性地切割或者制作模型的方法。本文利用三维激光表面扫描技术, 无损、快捷、方便地获取了 20 对现代中国人左右侧股骨外轮廓的三维数据, 采用 CAD 软件及几何形态测量方法对两侧股骨断面轮廓的大小及形状进行了对比和分析。初步研究结果发现: 两侧股骨的横断面相对面积差异极其显著, 绝对面积差异不显著, 不对称方式表现为波动不对称性, 而不是偏向不对称性; 个体之间两侧股骨横断面外轮廓形状的波动不对称性极其显著, 偏向不对称性虽有差异但不显著; 平均形状和面积分析结果似乎表明股骨稍有偏左侧优势。虽然本文所采用的标本量有限, 所得出的结论需要更多标本的进一步验证, 但是, 本文的研究结果提示利用三维激光扫描技术获取股骨横断面外轮廓数据, 并采用形态测量方法分析确实能够揭示出一些以往研究方法不能发现的重要信息, 这种研究骨骼不对称性的新方法值得进一步的应用。

关键词: 现代人; 股骨断面; 不对称性; 三维激光扫描; 几何形态测量

中图分类号: Q983⁺.8; **文献标识码:** A; **文章编号:** 1000-3193(2013)03-0354-11

1 引言

人类体质特征的两侧不对称性长期以来一直引起学者的广泛兴趣, 这种不对称性表现在头骨、脑、肌腱、肢骨等诸多方面^[1-8]。很多研究表明两侧的肢骨并不是完全对称的, 而是存在着左右侧差异, 上肢骨主要表现为右侧优势^[7,9-11], 下肢骨多表现为稍偏左侧优势^[8,12-14]。导致人体体质特征两侧差异的主要原因可能与遗传、环境和生活状态等因素有关^[15], 不对称性的研究为人类进化、人群内部和人群之间的差异以及环境气候的变化提供了重要证据^[8,12,16-20]。

国外很多学者分别从传统形态测量和生物力学分析等方面对股骨的左右侧差异进行了分析, 研究发现左右侧差异的表现方式主要有三种, 即波动不对称性 (Fluctuating

收稿日期: 2013-05-20; 定稿日期: 2013-07-08

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05130102)、中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-03)、国家自然科学基金 (41272034) 资助

作者简介: 魏偏偏 (1989-), 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所硕士研究生, 主要从事古人类学研究, Email: weipianpian@ivpp.ac.cn

asymmetry)、偏向不对称性(Directional asymmetry)和反对称性(Antisymmetry)。波动不对称性是指生物体相对于两侧对称性状的较小的随机偏差,呈正态或尖峰态分布,可用来指示环境压力对生物群体的影响^[21];偏向不对称性是指明显偏离中轴的对称分布,表现为左侧或右侧的偏向性,反映了左侧或右侧优势^[22];反对称性是指左侧和右侧优势分布基本相等,整体表现有一定的规律性。国内关于中国现代人群体质特征的两侧不对称性研究资料较少,以往的研究主要集中在活体的测量上^[23-30],虽然有学者对长骨骨重的非对称性进行了研究^[31],但在股骨两侧差异上的研究几乎是空白。

人类体质特征左右侧差别的表现方式多样,表现程度也不尽一致。有些差别通过传统的肉眼观察^[32]或线性测量^[12]就能够发现,而更多的差别由于其表现方式特别,或表现程度不明显,采用传统的研究方法或手段难以检测。如传统的线性测量方法获取的仅是一些测量数据方面的差异,所包含的信息相对有限。由于研究手段及方法的限制,骨骼与牙齿轮廓形状、对称性、精确面积测量、肢骨断面形状、内部结构等方面的信息通过传统方法是无法研究的。股骨的左右侧差异分析很大程度上取决于研究方法,因为很多差异信息需要通过对断面的形态分析才能获得。近年来,CT、三维激光扫描、几何形态测量、数字图像分析等研究方法和手段被广泛运用于古人类学和体质人类学研究。国内学者也开展了相关研究,如吴秀杰等采用三维激光扫描技术研究了周口店直立人脑形态的不对称性^[4]。

长期以来,人类股骨两侧差异的研究方法多限于传统的线性测量和生物力学分析,近年来,新的研究方法的应用突破了传统线性测量的局限性,主要是采用CT扫描、X射线或直接切割的方法对股骨断面进行了相关的力学和几何形态测量分析。目前,国内使用新方法对股骨断面进行研究的资料较少,仅何嘉宁^[33]使用生物力学分析的方法对高资人股骨断面进行了分析。这些新的研究方法,为研究人类的行为活动和生活方式提供了很多重要的信息。目前,关于人类股骨两侧差异的研究方法仅限于传统的线性测量和生物力学分析,这两种方法都揭示出人类股骨的左右侧存在差异,一般表现为稍偏左侧优势。还没有学者使用几何形态测量的方法对股骨横断面的左右侧差异进行分析,而三维激光扫描和几何形态测量方法可以将股骨的左右侧差异进行更加准确和量化的研究,同时,国内现代人群股骨断面形状的左右侧差异研究也几乎是空白。鉴于此,本文尝试利用三维激光扫描技术,结合形态测量(morphometrics)方法,对现代中国人股骨断面形状的左右侧差异进行对比分析。同时,希望本研究能够拓展国内古人类学和体质人类学的研究。

2 材料与方法

2.1 材料

根据标本的保存情况,本文选取属于同一个体的左右侧股骨保存完好的华北/华南地区的现代人20例做不对称性研究,标本现保存于中国科学院古脊椎动物与古人类研究所。

2.2 三维数据采集

使用日本HIROX公司生产的非接触式三维激光扫描仪(型号:RANGE 7)对每一件股骨标本进行了扫描,获取股骨的三维虚拟数字模型。扫描仪的精确度为 $\pm 40\mu\text{m}$,密度

分辨率 $80\mu\text{m}$ ^[34], 此款扫描仪体积小便于携带, 能够精确量化标本目标区域内的三维结构, 适合于人类头骨^[4]、股骨^[35]等标本的分析, 现已成熟的运用到古人类的研究中。利用三维图像处理软件 Rapidform XOV2(韩国 INUSTechnology 公司)对导入文件进行相应的优化处理, 将股骨的三维虚拟模型放置在标准平面上, 在生物力学长度(与股骨干长轴平行的内、外髁到股骨颈最下端距离的均值^[19])80%处(股骨头近端, 距小转子最远端 1-2cm)进行切割^[36], 获取相应的股骨横断面外轮廓(图 1), 本文之所以选择股骨 80% 横断面, 是因为近几年的生物力学研究表明, 该位置具有明显的人群差异, 对于解释人类的行为活动发挥了重要的作用^[18]。使用 Photoshop® 对破损的部位进行部分修复, 通过填充获取实体的轮廓图, 以此来精确测量股骨 80% 横断面的面积、获取断面轮廓形状, 并分析这两个指标的左右侧差异。

2.3 股骨生物力学长度 80% 处的横断面面积的测量和统计分析

利用绘图工具 AutoCAD® 精确测量股骨 80% 的横断面的面积, 对获取的 20 对股骨面积数据, 采用以下公式计算出同一个体每一对股骨断面面积的左右侧绝对差异(两侧面积绝对值的差别)和相对差异(两侧面积相对值的差别):

股骨断面面积绝对差异(mm^2)= 右侧面积-左侧面积

股骨断面面积相对差异(%)=[|右侧面积-左侧面积|/(右侧面积+左侧面积)] $\times 100$

使用 R 2.14.2(<http://www.r-project.org/>)软件分析左侧和右侧股骨 80% 横断面面积波动范围, 使用 SPSS 13.0(<http://www.spss.com>)软件进行显著性检验(Paired Samples *t*-Test)和相关性分析, 验证股骨生物力学长度 80% 处的左右侧横断面面积是否有显著性差异以及相关性。计算每个个体左右侧股骨 80% 横断面面积的相对差异, 分析相对差异的显著性。

2.4 股骨生物力学长度 80% 处的横断面轮廓形状分析——几何形态测量

几何形态测量方法是基于坐标点数据来量化研究对象形状的一种方法, 是获取、处理和统计分析的一个综合过程^[37]。这种方法可以通过 GPA(Generalized Procrustes Analysis)排除大小、位置和方向等因素的影响, 对标本的平均形状及其变异范围进行估计^[38]。实际上, GPA 是将原始数据转化为可以进行统计分析的一个操作过程, 其分析过程需要标志点和半标志点的坐标信息。标志点是生物体表面的明显解剖位点, 如股骨的大小转

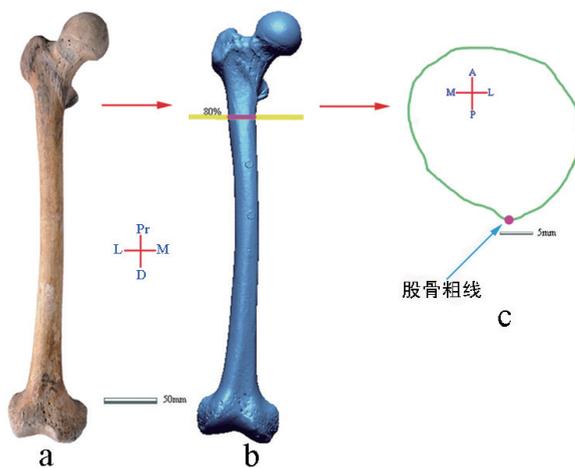


图 1 股骨生物力学长度 80% 的横断面轮廓形态

Fig. 1 Cross-sectional outlines of femoral bone length 80%

(a: 股骨照片; b: 三维激光扫描获取的股骨三维虚拟数字模型; c: 股骨生物力学长度 80% 的横断面轮廓) A: 前侧; P: 后侧; M: 内侧; L: 外侧; Pr: 近端; D: 远端 (a: original femur; b: 3-D virtual digital model from 3-D laser scanner; c: cross-sectional contour of femoral bone length 80%) A: anterior; P: posterior; M: medial; L: lateral; Pr: proximal; D: distal

子等^[39]。半标志点则是在缺乏明确定位的标志点时，均匀分布在样本轮廓上的多个位点^[40]，为了避免半标志点分布的任意性对样本分析的影响，采用滑动技术 (sliding techniques) 处理半标志点，形成滑动半标志点 (sliding semilandmarks)，这样可以减少对应标志点之间的 P 距离 (Procrustes distance)^[41]。

预处理：在 GPA 的过程中，Procrustes 旋转 (Procrustes rotation) 会对类似于本文的股骨横断面等接近于圆形的轮廓有影响，鉴于此，本文将股骨 80% 横断面轮廓以股骨粗线为原点进行镜像^[42]，分析的对象是股骨 80% 横断面对称的镜像轮廓图。

标志点和半标志点的选取：将股骨 80% 横断面股骨粗线的位置选取为标志点 (图 2)。使用绘图工具 AutoCAD® 对股骨 80% 处横断面轮廓线进行了 40 等分，等分点即为半标志点。在分析波动不对称性时，需要计算两次测量的人为测量误差，因此，标志点和半标志点的选取操作两次，间隔一天。

TPS (Thin Plate Spline)：TPS 通过变性网格的形式描述了不同形状的变形^[39]，可以将几何形态的差异划分为均匀差异成分和非均匀差异成分，后者通过 TpsRelw 软件完成相对形变分析 (relative warp analysis)，并获得一组局部变形指标 (partial warps scores)，可以对这些指标进行相应的主成分分析^[43]。

股骨 80% 横断面轮廓形状左右侧差异性检验：本文采用 MorphoJ (http://www.flywings.org.uk/MorphoJ_page.htm) 进行 Procrustes 方差分析^[44] (Procrustes ANOVA)，以基于 F 统计的参数检验^[45] 分析股骨干横断面轮廓形状左右侧差异的显著性。本文对股骨断面面积和轮廓形状左右侧差异的检验均以 5% ($P < 0.05$) 作为显著性水平。

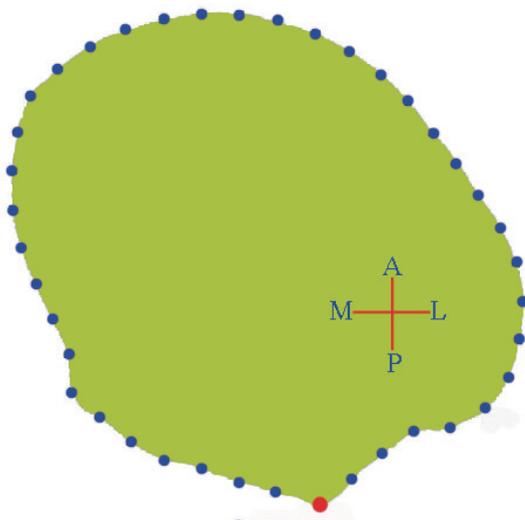


图 2 股骨干横断面镜像图的几何形态测量的标志点 (红点) 和半标志点 (蓝点)

Fig. 2 Landmarks (red points) and semi-landmarks (blue points) of the geometric morphometric analysis on the cross-sectional mirrored configurations of femora

A: 股骨前侧; P: 股骨后侧; M: 股骨内侧; L: 股骨外侧
A: anterior; P: posterior; M: medial; L: lateral

3 结果

3.1 左、右侧股骨 80% 横断面面积的比较

表 1 列出了每个个体左、右侧股骨 80% 横断面面积及其左右侧之间的绝对差异和相对差异，绝对差异会受到个体大小的影响，可以分析左右侧股骨断面面积的偏向性；相对差异显示的是百分比，排除了个体大小的影响，可以反映出左右侧股骨断面面积的真实差异。统计分析结果显示，两侧股骨 80% 横断面面积都符合正态分

表 1 股骨 80% 横断面面积

Tab. 1 Cross-sectional areas of femoral 80%

标本号	股骨80%处横断面面积 (mm ²)		左、右侧横断面面积	左、右侧横断面面积
	右侧	左侧	绝对差异 (mm ²)	相对差异 (%)
1	366.89	305.14	61.75	9.1880
2	590.31	580.03	10.28	0.8789
3	486.71	533.13	-46.42	4.5517
4	637.89	578.74	59.15	4.8626
5	594.59	531.72	62.87	5.5825
6	634.09	602.77	31.32	2.5330
7	401.73	390.38	11.35	1.4331
8	522.03	532.68	-10.65	1.0097
9	581.87	549.29	32.58	2.8803
10	537.57	537.16	0.41	0.0386
11	564.15	554.18	9.97	0.8918
12	531.30	476.72	54.58	5.4140
13	431.73	412.52	19.21	2.2751
14	477.71	476.81	0.90	0.0945
15	479.44	461.81	17.63	1.8723
16	430.64	442.06	-11.42	1.3095
17	355.15	369.77	-14.62	2.0177
18	452.02	501.53	-49.51	5.1915
19	380.02	373.62	6.40	0.8487
20	596.63	553.30	43.33	3.7688

布, $t=0.1309$, $df=19$, $P=0.061 (>0.05)$; 右侧面积均值 502.62mm^2 , 最大和最小值的变异范围是 $355.15\sim 637.89\text{mm}^2$; 左侧面积 488.17mm^2 , 最大值和最小值的变异范围是 $305.14\sim 602.77\text{mm}^2$; 左右侧面积的相关系数为 0.932 (表 2)。图 3 显示大部分个体 (15 例) 的右侧股骨 80% 横断面面积大于左侧, 只有少数个体 (5 例) 的左侧面积大于右侧, 这种绝对差异的分布较为分散。表明右侧股骨 80% 横断面面积稍大于左侧, 但这种偏向不对称没有达到显著性水平 ($P>0.05$)。

相对差异的统计分析结果显示: 相对差异的均值是 2.8321% , 相对差异最大值和最小值变异范围是 $0.0386\%\sim 9.1880\%$, $t=5.399$, $df = 19$, $P=0.000 (<0.05)$, 左、右侧股骨 80% 横断面面积的相对差异达到了显著性水平 (表 3)。股骨 80% 横断面左右侧面积的绝对差异不显著, 而相对差异显著, 似乎说明股骨 80% 横断面面积的左右侧具有明显的不对称性, 但偏向不对称性没有达到显著性水平。

3.2 左、右侧股骨生物力学长度 80% 横断面轮廓的几何形态测量

分析结果显示, 本文研究的 20 例个体左右侧股骨之间股骨生物力学长度 80% 处的横断面几何形态的差异极其显著 ($P<0.001$), 两侧股骨断面形状具有明显的不对称

表 2 左、右侧股骨 80% 横断面面积的统计分析

Tab.2 Statistical analysis of left and right femoral 80% cross-sectional areas

	均值 (mm ²)	样本数	最大值和最小值的变异范围 (mm ²)	R	t	df	Sig(2-tailed)
左侧	488.17	20	305.14~602.77	0.932	1.988	19	0.061
右侧	502.62	20	355.15~637.89				

注: R 为相关系数; df 为自由度; Sig 为显著性

性，但是没有明显的偏左侧或右侧的优势 ($P=1.0000$)，表现为波动不对称性 ($P<0.0001$) (表 4)。

尽管两侧的偏向不对称性没有达到显著性差异，但左右侧的平均形状还是具有一定规律性的 (图 4)。当图的大小为 1:1 时，左、右侧股骨 80% 横断面轮廓平均几何形状基本是重叠的，当左、右侧平均形状之间的差异放大 5 倍之后，可以看出主要表现在股骨粗线和股骨前侧附近。左侧股骨 80% 横断面股骨粗线附近内后侧向内凹，

股骨粗线两边的轮廓线夹角较小，前侧两边轮廓线之间的夹角较小，内前侧倾斜度大，外侧内收，股骨粗线附近的内后侧倾斜角较大；右侧则更加圆钝，面积稍大。

图 5 显示主成分 1(PC1) 和主成分 2(PC2) 分别解释了股骨断面形状总体变异的 46.38% 和 28.98%。分布在横坐标正值范围的股骨 80% 横断面轮廓明显向内侧倾斜，前侧两边轮廓线之间的夹角基本达到 180°，股骨粗线附近的内后侧倾斜角减小，外外侧倾斜角增大，标志点向外侧偏移。分布在横坐标负值范围的标本整个轮廓线形状向外侧倾斜，内前侧倾斜角度增大，前侧两边轮廓线之间的夹角减小，股骨粗线附近的内后侧倾斜角增大，外外侧倾斜角减小，标志点向内侧偏移。位于纵坐标正值范围的轮廓形状没有明显的倾斜，面积明显增大，内外侧之间的距离增大，前侧两边轮廓线之间的夹角增大，股骨粗线附近的内后侧和外外侧倾斜角都减小，标志点两边轮廓线之间的夹角明显增大，整体形状比较圆钝。位于纵坐标负值范围的轮廓形状没有明显的倾斜，面积明显减小，内外侧之间的距离明显减小，前侧两边轮廓线之间的夹角减小，股骨粗线附近的内后侧和外外侧倾斜角都增大，标志点两边轮廓线之间的夹角明显减小，整个轮廓形状比较锐利、狭长。从离散度上来看，左侧股骨生物力学长度 80% 处的横断面轮廓形状相对分散，右侧则相对集中。从整体分布图来看，形状的数据分布比较集中，似乎说明多数标本的股骨 80% 横断面轮廓的形状接近，形状变异范围不大。

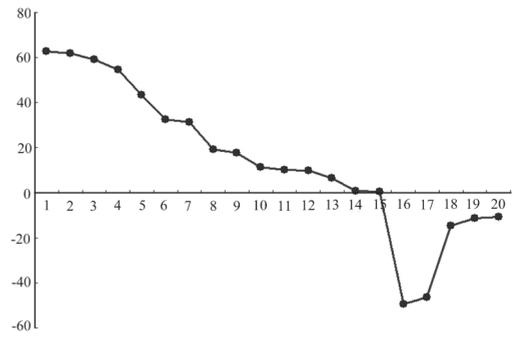


图 3 左、右侧股骨 80% 横断面面积绝对差异
Fig. 3 Absolute differences of left and right cross-sectional areas of femoral 80%

表 3 左、右侧股骨 80% 横断面面积相对差值的统计分析

Tab. 3 Statistical analysis of relative difference of left and right femoral 80% cross-section outlines

	均值 (%)	样本数	最大值和最小值变异范围 (%)	标准误	t	df	Sig(2-tailed)
$[R-L /(R+L)]*100$	2.8321%	20	1.7343~3.9300%	2.3457	5.399	19	0.000

注：R：右侧；L：左侧

表 4 股骨 80% 横断面两侧不对称性的几何形态的 P 方差分析

Tab. 4 Geometric shape Procrustes ANOVA of femoral 80% cross-sectional bilateral asymmetry

	SS	MS	df	F	P
个体	0.43537902	0.0001487967	2926	6.28	<0.0001
侧别	0.00065549	0.0000042564	154	0.18	1.0000
个体*侧别	0.06934803	0.0000237006	2926	442.44	<0.0001
测量误差	0.00032998	0.0000000536	6160		

注：SS：平方和，Sums of squares across landmarks and coordinates; MS：均方，Mean sums of squares 均方 (SS/df)

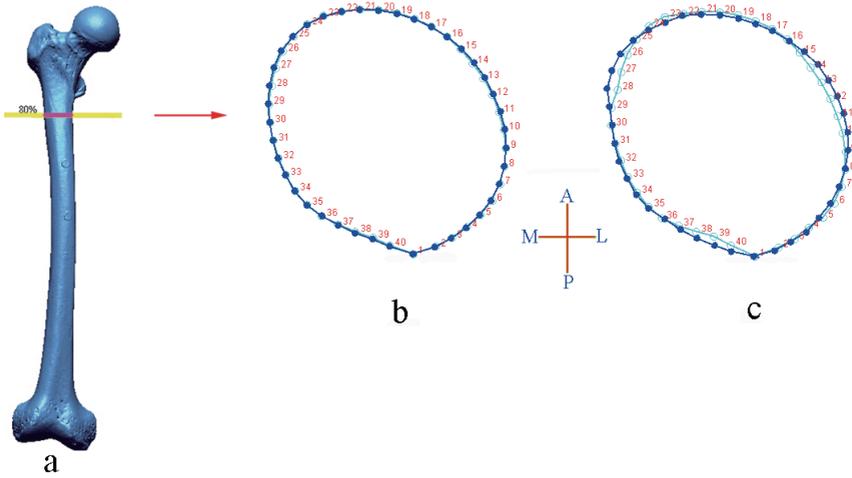


图 4 左、右侧股骨 80% 横断面轮廓的平均形状 (右侧股骨平均形状: 深蓝色, 左侧股骨平均形状: 淡蓝色; c: 股骨三维虚拟数字模型; b: 1:1; c: 1:5)

Fig. 4 Left and right cross sectional mean shape of femoral 80% (mean shape of right femur: dark blue, mean shape of left femur: light blue; a: 3-D virtual digital model of femur, b: 1:1, c: 1:5)

A: 股骨前侧; P: 股骨后侧; M: 股骨内侧; L: 股骨外侧 A: anterior; P: posterior; M: medial; L: lateral

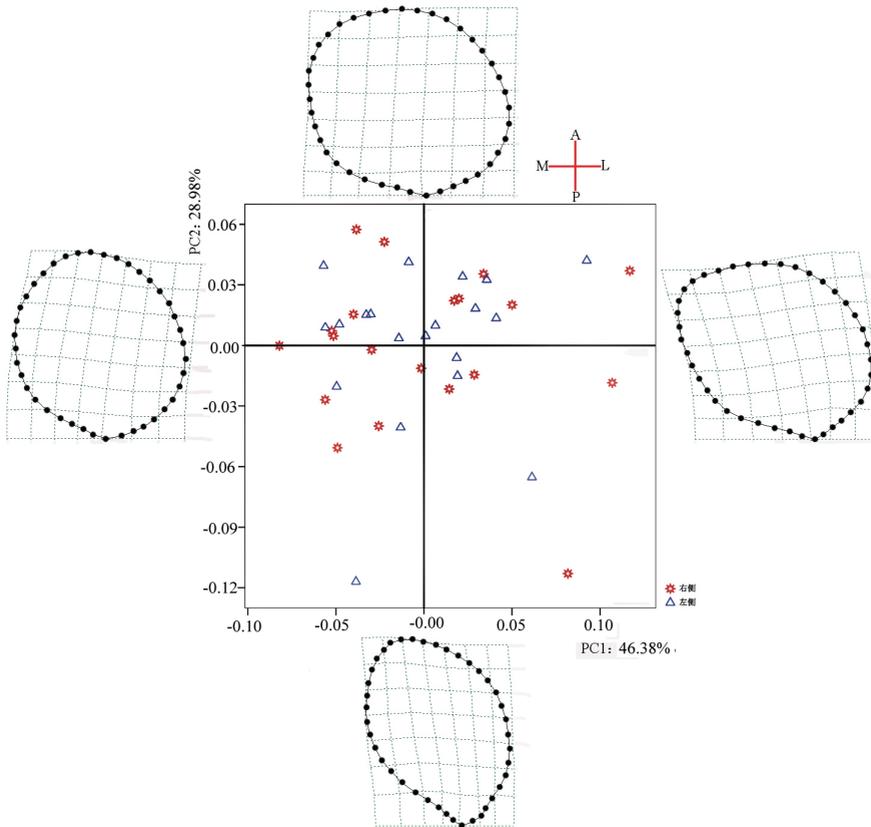


图 5 股骨 80% 横断面轮廓的 TPS 分析

Fig. 5 Tps analysis of femoral 80% cross-section

A: 股骨前侧; P: 股骨后侧; M: 股骨内侧; L: 股骨外侧 A: anterior; P: posterior; M: medial; L: lateral

4 讨论

本文的研究表明，三维激光扫描技术与几何形态测量方法的结合确实能够揭示出一些股骨横断面形状及其两侧不对称性的重要信息。这种方法更量化和直观地分析了股骨横断面的形状，突破了传统的线性测量和力学分析在研究股骨形状上的局限性。

4.1 中国现代人群股骨横断面面积的两侧差异

本文利用三维激光扫描技术获取股骨三维虚拟数字模型，并对现代中国人左、右侧股骨生物力学长度 80% 处的横断面面积进行了比较，分析结果初步显示：股骨 80% 横断面面积的绝对差异没有达到显著性，而相对差异达到了显著性。说明股骨 80% 横断面面积具有明显的波动不对称性，偏向不对称性不显著，但左右侧平均形状和绝对差异的分布趋势结果显示右侧的面积稍大于左侧。

从左、右侧股骨 80% 横断面轮廓的平均形状可以看出(图 4)，左侧的平均形状的面积稍小于右侧，股骨粗线是肌肉附着的主要位置，左侧的股骨粗线附近的轮廓较为锐利，表明左侧股骨 80% 横断面的肌肉附着较右侧发达。初步表明左侧股骨的肌肉较为发达，即稍偏左侧优势，但没有达到显著性，这与 Ruff^[14, 19] 和 Auerbach^[12] 的研究结果相符。

4.2 中国现代人群股骨横断面形状的两侧差异

本文采用几何形态测量的方法对现代中国人股骨生物力学长度 80% 处的横断面轮廓形状进行了分析，初步发现：尽管股骨干横断面形状具有明显的波动不对称性，但左、右侧的偏向不对称性没有达到显著性。

使用方差分析初步发现左、右侧股骨 80% 横断面轮廓形状之间的差异没有明显的偏向性，但是却具有明显的波动不对称性，同时，个体之间股骨干横断面的形状具有明显的差异。

4.3 中国现代人群股骨横断面两侧差异性分析

本文从股骨 80% 横断面面积和几何形状两个方面研究了股骨的两侧不对称性，初步发现：左右侧股骨具有显著性差异，波动不对称性显著，没有明显的偏向不对称性，稍有偏左侧优势，个体之间股骨差异较大。这似乎表明生活环境和生活习惯可能对股骨干横断面影响较大，股骨干横断面的差异可能对分析不同人群之间的生活环境提供重要的线索。

由于活动量的逐渐减少，现代人骨骼的粗壮度逐渐减小^[46]，这可能是导致股骨两侧偏向不对称性程度不显著的其中一个原因。同时，本文选取的样本量较小，仅研究了股骨生物力学长度 80% 的横断面，分析结果所揭示的可能仅仅是一种现象，是否代表整个人群的总体趋势，还需要更大量的标本来进一步的验证。

4.4 三维激光扫描技术和几何形态测量方法在股骨断面分析上的应用

获取股骨横断面的传统方法主要有两种，即直接切割和制作标本模型，前者会对标本造成不可逆的破坏，后者费时费力。近年来，股骨的研究较多使用 CT 扫描技术获取股骨断面的三维虚拟数字模型，这种技术不仅可以获取股骨内部和外部的整体信息，而且不会对标本造成破坏，但其花费较高、费时，不适于进行较大样本量的分析。三维激光扫描

技术花费较低、省时, 仪器较小且便于携带, 其获取的股骨三维数据也能够反映出股骨断面力学^[35]和形状的重要信息。

股骨横断面的左右侧差异主要表现在大小和形状上, 使用肉眼观察或线性测量只能判断较为明显的形状差异, 几何形态测量的方法可以量化股骨横断面形状的左右侧差异, 将几何形状的差异进行更加准确的分析。本文利用镜像几何形态测量的方法避免了 Procrustes 旋转对股骨横断面形状的影响, 与传统的线性测量和生物力学分析相比, 更直观地展示了股骨横断面形状的左右侧差异, 使用 Procrustes 方差分析量化了股骨横断面形状的两侧不对称性的表现形式, 是分析骨骼两侧不对称性的一种较为新颖的方法。这种研究骨骼不对称性的新方法有待进一步的应用。

致谢: 吴秀杰和刘武两位老师审阅了初稿并提出了具体修改意见, 作者谨致谢意!

参考文献

- [1] Gundara N, and S. Zivanovic. Asymmetry in east African skulls [J]. *Am J Phys Anthropol*, 1968, 28: 331-337
- [2] Holloway RL, De La Costelareyondie MC. Brain endocast asymmetry in pongids and hominids: Some preliminary findings on the paleontology of cerebral dominance [J]. *Am J Phys Anthropol*, 1982, 58: 101-110
- [3] Holloway RL. Volumetric and asymmetry determination on recent hominid endocasts: Spy I and Spy II, Djebel Ihroud I, and the Salè *Homo erectus* specimens with some notes on Neandertal brain size [J]. *Am J Phys Anthropol*, 1981, 55: 385-393
- [4] 吴秀杰, 潘雷. 利用 3D 激光扫描技术分析周口店直立人脑的不对称性 [J]. *科学通报*, 2011, 56(16): 1282-1287
- [5] Drapeau Michelle SM. Enthesis bilateral asymmetry in humans and African apes [J]. *HOMO: Journal of Comparative Human Biology*, 2008, 59(2): 93-109
- [6] Leche Stella M. Handedness and bimanual dermatoglyphic differences [J]. *American Journal of Anatomy*, 1933, 53(1): 1-53
- [7] Schell Lawrence M, et al. Directional asymmetry of body dimensions among white adolescents [J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 1985, 67(4): 317-322
- [8] Latimer Homer B, EW Lawrance. Bilateral asymmetry in weight and in length of human bones [J]. *The Anatomical Record*, 1965, 152(2): 217-224
- [9] Auerbach Benjamin M, Michelle H Raxter. Patterns of clavicular bilateral asymmetry in relation to the humerus: Variation among humans [J]. *Journal of Human Evolution*, 2008, 54(5): 663-674
- [10] Lazenby Richard A, Cooper David ML, Angus Sarah, et al. Articular constraint, handedness, and directional asymmetry in the human second metacarpal [J]. *Journal of Human Evolution*, 2008, 54(6): 875-885
- [11] Stirland AJ. Asymmetry and activity-related change in the male humerus [J]. *International Journal of Osteoarchaeology*, 1993, 3(2): 105-113
- [12] Auerbach Benjamin M, Christopher B Ruff. Limb bone bilateral asymmetry: Variability and commonality among modern humans [J]. *Journal of Human Evolution*, 2006, 50(2): 203-218
- [13] Krishan Kewal. Marked limb bilateral asymmetry in an agricultural endogamous population of North India [J]. *American Journal of Human Biology*, 2011, 23(5): 674-685
- [14] Ruff Christopher B, Wilson C Hayes. Cross-sectional geometry of Pecos Pueblo femora and tibiae-A biomechanical investigation: II. Sex, age, and side differences [J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 1983, 60(3): 383-400
- [15] Kanchan Tanuj, Mohan Kumar TS, Pradeep Kumar G, et al. Skeletal asymmetry [J]. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 2008, 15(3): 177-179
- [16] Stock JT, Pfeiffer SK, Chazan M, et al. F-81 skeleton from Wadi Mataha, Jordan, and its bearing on human variability in the Epipaleolithic of the Levant [J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 2005, 128(2): 453-465
- [17] Ruff Christopher B, Wilson C Hayes. Cross-sectional geometry of Pecos Pueblo femora and tibiae-A biomechanical investigation: I.

- Method and general patterns of variation [J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 1983, 60(3): 359-381
- [18] Ruff CB, Larsen CS, Hayes WC. Structural changes in the femur with the transition to agriculture on the Georgia coast [J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 1984, 64(2): 125-136
- [19] Shackelford LL. Regional variation in the postcranial robusticity of late Upper Paleolithic humans [J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 2007, 133(1): 655-668
- [20] Stock JT, and Pfeiffer SK. Long bone robusticity and subsistence behaviour among Later Stone Age foragers of the forest and fynbos biomes of South Africa [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2004, 31(7): 999-1013
- [21] Hallgrímsson Benedikt. Ontogenetic patterning of skeletal fluctuating asymmetry in rhesus macaques and humans: Evolutionary and developmental implications [J]. *International Journal of Primatology*, 1999, 20(1): 121-151
- [22] Kujanová M, Bigoni L, Velemínská J, et al. Limb bones asymmetry and stress in medieval and recent populations of Central Europe [J]. *International Journal of Osteoarchaeology*, 2008, 18(5): 476-491
- [23] 邓典智, 周冰晶, 夏田. 关于正常人面部两侧对称性的初步研究 [J]. *临床口腔医学杂志*, 1991, 7(1): 19-22
- [24] 党浩, 李霞, 霍正浩, 等. 先天性心脏病患者皮纹波动不对称性的研究 [J]. 2010, 29(3): 276-281
- [25] 樊晓光, 丁士海, 张忠安. 山东半岛地区大学生手、足长非对称性的研究 [J]. *解剖学杂志*, 1998, 21(4): 360-363
- [26] 付小勇, 梅凌, 张英琦, 等. 寰椎不对称性的解剖学研究及临床意义 [J]. *中国康复医学杂志*, 2009, 24(5): 426-432
- [27] 李岩, 徐飞. 大学生足部形态指标的非对称性研究 [J]. *中国学校卫生*, 2006, 27(2): 137-138
- [28] 陆宏, 霍正浩, 党浩, 等. 冠心病患者数量皮纹学特征波动性不对称的研究 [J]. *人类学学报*, 2010, 29(4): 431-436
- [29] 陆宏, 党浩, 霍正浩, 等. 生物体波动不对称与人类疾病的研究进展 [J]. *宁夏医科大学学报*, 2011, 33(9): 899-901
- [30] 陆宏, 霍正浩, 高平, 等. 乳腺癌患者数量皮纹学特征的波动不对称性 [J]. *解剖学报*, 2009, 1: 37-40
- [31] 任光金, 丁士海, 武传德. 下肢股骨重的非对称性 [J]. *人类学学报*, 1989, 8(2): 155-157
- [32] Woo Ju-kang. The unbalanced development of the physical features of *Sinanthropus pekinensis* and its interpretation [J]. *Vertebrata Palasiatica*, 1960, 6: 17-28
- [33] 何嘉宁. “高资人”化石与股骨形态变异的生物力学分析 [J]. *科学通报*, 2012, 57(10): 830-838
- [34] 邢松, 张银运, 刘武. 周口店直立人 3 号与 5 号头骨形态特征对比及其演化速率所反映的群体隔离 [J]. *人类学学报*, 2012, 31(3): 250-258
- [35] Macintosh AA, Davies TG, Ryan TM, et al. Periosteal versus true cross-sectional geometry: A comparison along humeral, femoral, and tibial diaphyses [J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 2013, 150(3): 442-452
- [36] Trinkaus E, Churchill SE, Ruff CB, et al. Long bone shaft robusticity and body proportions of the Saint-Césaire 1 Châtelperronian Neanderthal [J]. *Journal of Archaeological Science*, 1999, 26(7): 753-773
- [37] Slice DE. Geometric morphometrics [J]. *Annual Review of Anthropology*, 2007, 36: 261-281
- [38] Klingenberg Christian Peter, Marta Barluenga Axel Meyer. Shape analysis of symmetric structures: Quantifying variation among individuals and asymmetry [J]. *Evolution*, 2002, 56(10): 1909-1920
- [39] Zelditch ML, Swiderski DL, Sheets HD, et al. *Geometric Morphometrics for Biologists: A Primer* [M]. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004
- [40] Bookstein Fred L. Landmark methods for forms without landmarks: Morphometrics of group differences in outline shape [J]. *Med Image Anal*, 1997, 1: 225-243
- [41] Sampson PD, Bookstein Fred L, Sheehan H et al. Eigenshape analysis of left ventricular outlines from contrast ventriculograms [A]. In: Marcus LF, Corti M, Loy A, Naylor GJP, Slice DE. *Advances in Morphometrics*. Plenum, New York, 1996, 131-152
- [42] Xing Song, Gibbon Victoria, Clarke Ronald, Liu Wu. Geometric morphometric analyses of orbit shape in Asian, African, and European human populations [J]. *Anthropological Science*, 2013, 121(1): 1-11
- [43] Bookstein Fred L. *Morphometric Tools for Landmark Data* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991
- [44] Klingenberg CP, GS McIntyre. Geometric morphometrics of developmental instability: Analyzing patterns of fluctuating asymmetry with Procrustes methods [J]. *Evolution*, 1998, 52(5): 1363-1375
- [45] Goodall CR. Procrustes methods in the statistical analysis of shape [J]. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*, 1991, 53(2): 285-339
- [46] Ruff Christopher B. Gracilization of the modern human skeleton [J]. *American Scientist*, 2006, 94(4): 504-514

Bilateral Asymmetry in Human Femoral Cross-sectional Surface Areas and Shapes: Morphometric Analysis Using 3D Laser Scanning

WEI Pian-pian^{1,2}, XING Song¹

1. *Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins, Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract: Paleoanthropologists have been paying more attention to human femoral cross-sectional surface areas, shapes and bilateral asymmetry because of the application of this information to human evolution, population differences, and survival movements. Traditional analyses of femoral cross-sections usually adopt methods of destructive cutting, or labor-intensive model making. In this study, using 3D laser scanning, we nondestructively and conveniently get the outer contour of 20 paired femoral 3-D data from a modern Chinese population. With the software of CAD and method of geometric morphometrics, we examine bilateral asymmetry between the left and right femoral cross-sectional area and shape. The results indicate that bilateral asymmetry in femoral size and shape exists. Cross-sectional areas of paired femora have no significant differences in absolute values, but have significant differences in relative ones. Paired femora show fluctuating asymmetry, rather than directional asymmetry. Moreover, significant differences on paired femoral cross-sectional shapes show fluctuating asymmetry. Directional asymmetry exists on paired femoral cross-sectional shapes, but it is not statistically significant. Average cross-sectional shapes and areas seem to indicate that human femora have a slight left-lateral dominance. Although the samples in this study are limited, and the conclusion needs more specimens for further verification, our results show that using 3D laser scanning techniques, we can get data of femoral cross-sectional outer contour, and the methods of morphometric analysis does reveal some important information that traditional methods can not determine. This paper establishes a new method to examine bone asymmetry, and can be used for additional studies in human evolution.

Keywords: Modern human; Femoral cross-section; Bilateral asymmetry; 3D laser scanning; Geometric morphometrics