

鲤鱼墩遗址史前人类行为模式的 骨骼生物力学分析

李法军^{1,2}

1. 中山大学社会学与人类学学院人类学系, 广州 510275; 2. 中山大学人类进化与科技考古实验室, 广州 510275

摘要: 近年来, 许多研究都发现人类活动水平与其长骨截面有显著的相关性。地处雷州半岛的鲤鱼墩遗址史前人类被认为营以捕捞采集为主, 辅以狩猎的综合经济。基于骨骼生物力学的方法, 本文对鲤鱼墩遗址史前人类长骨中部总横截面形态、骨骼的抗压、抗扭转、抗弯曲能力以及左右侧对称性进行了比较和分析, 在此基础上与其他不同时期人群进行对比, 进而对该人群的行为模式和生业方式进行了探讨。研究结果表明, 鲤鱼墩遗址史前人类在骨骼生物力学参数分布上与石器时代晚期南非人和原史安达曼岛人等已知的渔猎—采集型人群相类似。本研究结果支持目前考古学研究所认为的其社会经济是渔猎—采集型的结论。

关键词: 骨骼生物力学; 人类行为; 生业方式; 史前时期; 鲤鱼墩遗址

中图法分类号: Q983; 文献标识码: A; 文章编号: 1000-3193(2017)02-0193-23

The activity model of prehistoric people in the Liyudun site: A biomechanical analysis of bones

LI Fajun^{1,2}

1. Department of Anthropology, School of Sociology and Anthropology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275;

2. Laboratory of Human Evolution and Archaeometry, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275

Abstract: Recent research has shown that there are some important correlations between the level of human's activities and the cross-sectional shape of their long bones. Using biomechanical methods, this paper analyses the variation in cross-sectional shape, skeletal strength, stiffness and bilateral asymmetry of humeri, femora and tibiae from the early Neolithic site of Liyudun, South

收稿日期: 2015-10-20; 定稿日期: 2016-02-03

基金项目: 本研究是在中山大学“优秀青年教师培养计划入选者”资助项目(1309049-23000-3161141); 国家文物局文化遗产保护领域科学和技术研究课题(1204005-23000-4129003); 国家社会科学基金项目(13CKG002)以及国家社会科学基金重大项目(11&AD82)资助下完成的

作者简介: 李法军(1976-), 男, 汉族, 吉林省桦甸市人, 体质人类学博士。中山大学社会学与人类学学院人类学系副教授。
E-mail: lifajun@mail.sysu.edu.cn

Citation: Li Fajun. The activity model of prehistoric people in the Liyudun site: A biomechanical analysis of bone[J]. Acta Anthropologica Sinica, 2017, 36(2): 193-215

China, which some have suggested was typical hunter-gathering occurred as early as 7000-6000 BP cal. The results show the biomechanical properties of the Liyudun humans are more similar to those from other ancient and recent hunter-gatherer groups. In fact they share almost identical or very similar properties with Later Stone Age (LSA) southern African populations and proto-historic Andaman Islander foragers. These results, therefore, support the hypothesis that people at Liyudun were still practicing hunting and gathering during the early Neolithic of South China

Key words: Skeletal biomechanics; Human activity; Lifestyle; Prehistoric Age; Liyudun site

1 引言

鲤鱼墩遗址位于广东省湛江市遂溪县江洪镇东边角村东南之鲤鱼墩， $21^{\circ}00'39''N$, $109^{\circ}43'14''E$ (图 1)。鲤鱼墩因形似鲤鱼而得名，其东西长约 88.10m，南北宽约 35.31m，相对高度约 2m，遗址区现存面积约 $1200m^2$ 。2002 年 11 月至 2003 年 1 月，经广东省文物考古研究所申请国家文物局批准，由广东省文物考古研究所、湛江市博物馆和遂溪县博物馆联合组队对其进行了发掘^[1]。

尽管该遗址曾于 1958 年遭受过人为的破坏，但仍然出土了相对丰富的遗迹和遗物。文化堆积分为 6 层，除表土外，第 2~6 层为新石器时代文化层。其中，第 2~5 层为贝壳堆积，第 6 层为黄色沙土，不含贝壳。第 6 层陶片只有夹砂红陶，火候低，厚薄不均，纹饰凌乱、粗糙。第 5 层陶器为夹砂红褐陶，器形只见钵形釜，外饰绳纹再抹平，造成乳丁状效果。第 4 层陶器为夹砂褐陶，也只见钵形釜，外饰以毛蚶或泥蚶划出的或斜或竖的平行条纹。第 3 层出细砂磨光红衣陶，口沿被刻成锯齿状，颈部并有菱形交叉刻划纹。第 2 层出窄沿厚唇釜或罐。发掘者认为鲤鱼墩 4~6 层与广西邕宁顶蛳山三期有较多相似处，而 3 层则与顶蛳山四

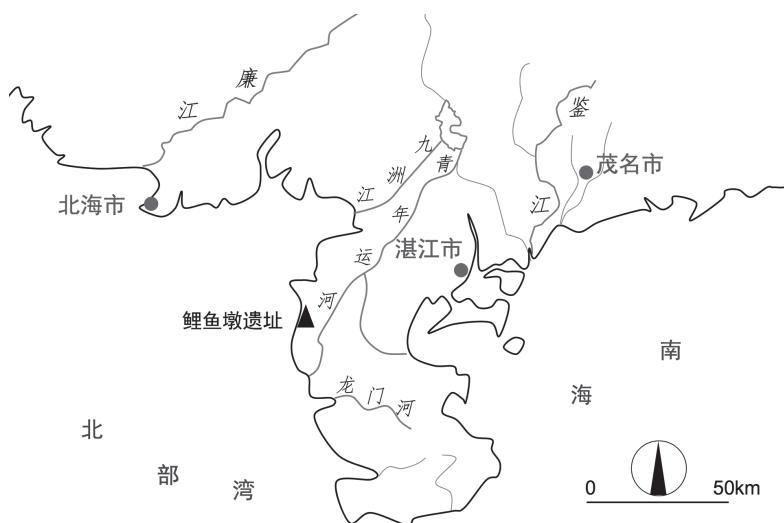


图 1 鲤鱼墩遗址位置示意图
Fig.1 Location of the Liyudun site

期和广东曲江石峡遗址一期有较多共同因素，鲤鱼墩2层釜、罐与珠江三角洲已趋同^[2]。

目前的¹⁴C测年数据有：探方0702（T0702）第4层碳土样本为5160±100BP、第4层贝屑样本为4820±100BP、第2层贝屑样本为4660±100BP；T0502第4层贝壳样本为5050±100BP^[2]。原报告中未说明这些¹⁴C测年数据是否为校正后的数据。在已发掘的墓葬中，2003年度遂溪鲤鱼墩6号墓（03SL-M6）、03SL-M7和03SL-M8都开口于第5层下，打破第6层。03SL-M6和03SL-M7位于2号房址（F2）内，打破F2，不排除二者为房内埋葬的可能性。03SL-M5与上述三座墓葬均属于第二期，年代约在7000-6000BP。03SL-M1、M2、M3和M4属于第三期，均位于第1层之B层下。这些墓葬的共同特点是墓坑较小，葬式为侧身屈肢，下肢蜷曲似抱膝状。颅骨形态学研究表明鲤鱼墩人属于蒙古大人种的范畴，是古华南类型的一个地方类型，与大陆东南亚地区史前人类的形态学联系较为密切^[3]。

在构建华南史前考古学文化谱系的过程中，考古学者们逐渐意识到了其古老性、多样性和复杂性^[4-5]。对这种多样性和复杂性的认知主要体现在考古学文化谱系、农业起源、生业方式和埋葬习俗方面^[6-11]。虽然已有的考古学研究已经揭示了许多华南史前时期重要遗址的文化特征，但由于发表资料相对较少，研究内容略显单一，华南史前文化的基本框架和序列还需要进一步构建^[12-17]。目前尚缺乏对其文化复杂现象的综合阐释，不能深入地分析某些重要文化现象发生的原因和过程。与此同时，在试图构建华南史前人类文化行为和生活史的完整图景时，考古学者和其他相关学者们都不得不面对着有效信息相对匮乏的困境。例如，不能依据墓葬形制判断特殊葬俗及其埋葬过程；不能依据出土器物确认史前华南地区人工拔牙现象的存在及其分布；更无法解释个体劳作的方式和强度、身体发育状况、饮食偏好、性别分工或食物分配等问题。而这些恰恰是分析人类文化行为时不可或缺的重要内容。因此，如何获取更多有效信息，以便科学地解答上述问题便成为了当下华南史前考古学的新课题。

国外学者依据人骨的分析，对泰国史前“内陆型”与“海岸型”遗址进行了比较研究，在一定程度上复原了两类遗址居民的生活史细节，并探讨了当时考古学文化间的交流模式^[18]。按照地理位置和相关考古学信息，华南史前遗址除了可分为洞穴、贝丘或河岸台地等类型外，也可被划分为“内陆型”与“海岸型”。两类遗址在文化性质上虽有诸多相似之处，但二者之间的差异性则更加明显。例如，内陆型遗址大多盛行曲肢葬，无人工拔牙现象，顶蛳山遗址中甚至出现了肢解葬这种特殊的葬式；海岸型遗址大多盛行仰身直肢葬，存在人工拔牙现象^[19]。二者在生业方式上虽已被推測为渔猎—采集类型，但由于居住环境的差异，二者在食物获取和饮食结构上也存在诸多不同。“华南线”假说的提出正是试图区分二者文化边界的一种尝试^[19]。如何科学地阐释这两类遗址反映出来的文化差异将是重构华南史前文化框架和序列的基础和关键。

人类的行为活动和社会发展与其所处的自然生态环境息息相关。华南地区史前时期人类经济活动和文化变迁与全新世以来的环境变化关系密切。古环境学和生物考古学的研究显示，该区域史前时期气候环境优越，动植物资源充足，为当地史前人类提供了丰富的食物来源，使得当时的人们可以从事稳定的渔猎、采集活动。其中包括猎取陆上野生动物，如鹿、象、兔、鸟等；另外包括捕捞水中的鱼虾和海生软体动物牡蛎、文蛤、魁蛤和陆生水中软体动物田螺、乌螺等。同时，可能采集可食的植物根、茎、果实等^[11, 20-22]。末次冰

期以后，全球的环境和动植物面貌发生了根本变化。一方面森林面积迅速扩大，增加了动物的活动范围，意味着古人捕杀动物难度的增加；另一方面，华南一带主要捕猎对象大熊猫-剑齿象动物群，大部分在冰期后灭绝。这些变化迫使古人不得不寻求新的食物来源。一部分开始从事种植和驯养业，全新世气候条件改善为农业的产生提供了良好的环境；另一部分则将注意力转向水域。海平面变化是华南地区沿海环境演变的一个主要因素，特别是全新世以来的海平面变化^[23]。末次冰期后，海平面迅速上升，华南沿海地区开始接受大规模海侵。此期间海平面迅速上升期（10000~6500 BP），其中7500 BP时已达现今海平面；高海平面时期（6500~4000 BP），海平面普遍高于现今1.5~3.0m^[24-25]。河水和海水相互交汇，来自陆上和海洋的各种营养物质在浅海地区聚集，使得该区成为水生生物的良好栖息地，为先民提供了丰富的贝类和鱼类来源，吸引先民进入该区从事捕捞和采集业，从而产生了独特的华南沿海地区新石器贝丘文化。这种独特的贝丘文化主要是以采集、渔猎为主^[26]，可能也兼营原始农业，如种植薯、芋等块茎类作物等^[11]。

鲤鱼墩遗址位于雷州半岛西海岸，地处海陆交接处，自然条件复杂，景观生态类型颇多，包括陆生景观、海岸景观、沿岸浅海景观。雷州半岛由玄武岩丘陵和台地构成，地表相对平坦，但地质灾害较为突出。古地理学研究表明，整个华南沿海地带史前时期的气候与现在大致相似，甚至更加湿热，生物资源更为丰富。一方面，华南沿海地区在6500~4000 BP之间，平均气温比现在要高，气候湿热，加上海侵的作用，海生生物格外繁盛，贝类和鱼类资源丰富，十分有利于古人发展其水产捕捞业和采集业；另一方面，此时期沿海从事捕捞业的先民能够在一个相对稳定的气候环境下生活^[27]，这有利于鲤鱼墩早期先民发展起稳定的海产捕捞业及采集业。

考古资料显示，鲤鱼墩遗址第一期陶器的部分特征与邕宁顶蛳山遗址第二期的相似，鲤鱼墩遗址第二期的年代应与顶蛳山遗址第三期的年代相当，而鲤鱼墩遗址第三、四期的陶器特征则比较接近珠江三角洲商时期的^[2, 28]。植硅石分析显示，顶蛳山遗址第四期（年代为6000BP前后）出现数量可观的稻属植硅石，表明稻作农业已经进入顶蛳山人的生活^[29]。鲤鱼墩遗址兽骨组成简单，鹿类占绝大多数，鱼脊椎骨数量也多。从水鹿和水牛牙齿磨损程度来看，被杀者均为老年和幼年个体，青壮年个体极少^[2]，不像人工饲养的情况下提供肉食的群体。鱼类品种较少，贝类品种丰富。研究者据此推测当时的社会经济是以捕捞采集为主，辅以狩猎的综合经济^[2]。

生物考古学的研究结果表明，鲤鱼墩遗址史前人类的牙齿磨耗程度远远超过北方地区的人群，龋齿率偏高，可能与华南地区渔猎-采集经济方式下的饮食结构有关^[30]。牙釉质的微痕分析表明，鲤鱼墩遗址史前人类牙釉质表面的磨损和崩裂现象可能与经常使用海洋性食物有关^[31]。鲤鱼墩遗址人骨的稳定同位素分析也显示，其先民主要以海生类作为主要食物来源，陆生食物在人类的食物中只居次要地位^[32]。

依据上述古环境学和考古学信息，我们不禁思考这样一个问题，即鲤鱼墩遗址史前人类是否如考古学研究所推测的那样，是营典型的渔猎-采集型生业方式？考虑到该遗址与顶蛳山文化的联系以及顶蛳山遗址晚期出现稻作迹象的事实，鲤鱼墩遗址是否可能正处于由渔猎-采集型生业方式向农业型生业方式转变的时期？

近十年来，依据人类遗骸进行文化行为研究已成为国际考古学的热点，特别是骨骼

生物力学分析在其中扮演了重要的角色。这种方法是将长骨骨干视为中空的柱状体, 依据生物力学的方法对其进行力的载荷分析。通过对特定横截面生物力学参数的计算和分析, 就可以衡量个体骨骼的发育强度和活动特点^[33-35]。这种方法可以更有效地对个体的生前行为特点和活动强度进行评估, 能够在很大程度上对生业方式和个体行为进行阐释^[36-40]。因此, 本文希望通过骨骼生物力学方法, 对鲤鱼墩遗址史前人类的个体行为特点进行分析, 并尝试验证上述的推测。

2 材料与方法

2.1 鲤鱼墩遗址骨骼样本信息

本次研究所用人骨材料包括5例个体, 现保存于中山大学人类进化与科技考古实验室。有关人骨材料的具体信息见表1。

2.2 骨骼的修复与pQCT图像的获取

本文所涉及的骨骼生物力学分析是基于骨骼特定横截面进行的, 因此在分析前需要进行骨骼特定横截面的提取。目前有两种主要的提取方式: 一是使用精细硅橡胶印模材料, 二是使用CT断层扫描仪。虽然这两种方法所获取的骨骼横截面差异较小^[41], 但CT断层扫描仪所获取的横截面不仅数量多, 而且更为精确, 也能同时获取骨骼内部的信息。本文使用了中山大学第一附属医院的日本东芝公司 Aquilion 64 CT断层扫描仪, 对所选择的长骨进行全部扫描(图2)。

为了节省扫描成本, 在扫描时尽可能将样本置于同一扫描批次内, 长骨骨干长轴尽量与CT扫描仪床板长轴同向或互相垂直(如图2所示)。由于骨骼样本较为残破, 为了尽可能获得相关数据, 应用Avizo[®]公司的Fire For Materials Science 6.3软件以及OsiriX软件, 在三维环境下依据同个体对侧同名骨骼形态特征, 在假设左右侧同名骨骼等长的前提下, 对残破的长骨进行了长度复原(图3)。

根据被扫描骨骼的实际轴向, 选择Fire For Materials Science 6.3软件, 将其调整至与扫描轴向垂直位。调整的标准是: 长骨远端首先被调整至扫描仪头侧(机架侧), 其近侧端被置于足侧。在被测长骨上添加一个与扫描轴向垂直相交的平面, 然后在被测长骨上再添加一个与此面垂直相交的平面, 新添加的平面即保证了与扫描轴向平行。逐步调整长骨, 使其骨干长轴与第二个平面平行。此时, 被测长骨的轴向已经由实际扫描轴向变为标准扫

表1 本文所用样本的基本信息

Tab.1 The basic information of specimens from the Liyudun site

墓葬号 Burial No.	性别 Sex [*]	年龄 Age	骨骼样本 Bone	文化期 Phase	¹⁴ C date	年代**
03SL M3	男	40-45	左侧肱骨, 右侧胫骨	3	< 4660±100BP	
03SL M4	男	20-25	左侧胫骨	3	< 4660±100BP	
03SL M5	男	成年	左、右侧股骨及左、右侧胫骨	2	> 5160±100BP	
03SL M6	男	30±	左侧肱骨, 左侧股骨和左侧胫骨	2	> 5160±100BP	
03SL M7	女	20±	左、右侧肱骨, 左、右侧股骨及左、右侧胫骨	2	> 5160±100BP	

注: *性别和年龄信息引自文献[31]。**所示“绝对年代”引自文献[2], 原文未提及是否为校正数值



图 2 鲤鱼墩遗址骨骼 CT 扫描样本的三维重建图

Fig.2 The 3D reconstruction by CT scanning for the Liyudun specimens

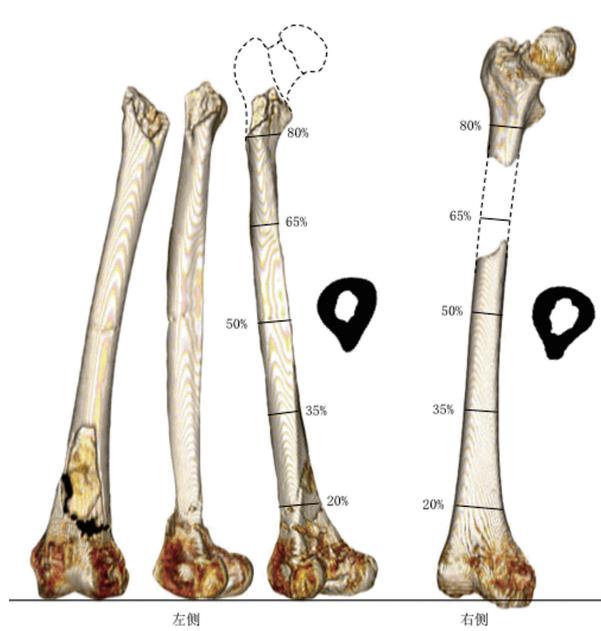


图 3 标本 03SL M7 左、右侧股骨的 OsiriX 软件三维重建结果

Fig.3 The 3D reconstruction of 03SL-M7 Femora by OsiriX
(pQCT 图设置: Window Level 为 513, Window Width 为 1148,

描轴向。通过参数设置和软件计算,第一个平面将自动调整到所需位置,此平面即为长骨骨干的垂直切面。提取了肱骨 35% 位置和 50% 位置以及股骨和胫骨 50% 位置的外围定量计算机断层扫描图像 (peripheral Quantitative Computed Tomography, pQCT) (图 3)。应用 ImageJ 软件 (<http://rsbweb.nih.gov/ij/download.html>) 及其骨骼力学参数分析插件 BoneJ plugin (<http://bonej.org/>)^[42] 进行相关骨骼生物力学参数的提取。

2.3 CSG 参数的定量

骨骼生物力学参数中主要的参数为“截面几何 (Cross-sectional geometric, CSG) 参数”,包括骨干横截面总面积 (Total area of section, 记作 S_t)、横向截面惯性矩 (Y-axis moment of area, 记作 I_y)、纵向截面惯性矩 (X-axis moment of area, 记作 I_x)、最大截面惯性矩 (Maximum second moments of area, 记作 I_{\max})、最小截面惯性矩 (Minimum second moments of area, I_{\min}) 和极惯性矩 (Polar second moments of area, J) (图 4)。

S_t 能反映骨干所受的压缩或拉伸力量,用以衡量骨骼粗壮程度以及拉伸强度,与骨骼的抗压和抗拉应力密切相关^[43-44]。 I_y 和 I_x 分别用以衡量骨干某一位置内外向和前后向的弯曲载荷, I_{\max} 和 I_{\min} 则分别用以衡量最大和最小的弯曲载荷。 J 则反映了骨干抗扭转载荷以及二次平均弯曲载荷的能力,它能够反应长骨骨干整体的机械载荷强度^[45-46], $J=I_{\max}+I_{\min}$ 。 I_x/I_y 和 I_{\max}/I_{\min} 也分别反映了骨干前后向—内外向的弯曲强度和最大—最小弯曲强度,而且二者具有明显的相关性^[41]。换句话说,二者所反映出来的骨骼抗弯曲载荷的能力是较为一致的,而且 I_{\max}/I_{\min} 较 I_x/I_y 更能有效地消除骨干横截面影像在量化时所产

生的定向误差^[47-48], 因此本文仅采用 I_{\max}/I_{\min} 来进行相关分析。 I_x/I_y 和 I_{\max}/I_{\min} 也能够反映出骨干截面的形态, 比值越大, 说明骨干截面形态越接近椭圆形; 比值越接近 1, 越表明骨干截面越趋向圆形。

因为材料所限, 本文只集中于该人群左右侧对称性、性别间差异以及其行为模式的探讨。为了了解这些个体的行为模式与现有资料类型的拟合程度, 本文还对其进行了“相对胫骨硬度”(Relative tibial rigidity) 的比较^[46]。“相对胫骨硬度”可以被用来估计上、下肢粗壮度分布的差异, 较高的比值反映了较高的胫骨粗壮度或较低的肱骨粗壮度。因个体间体重和身高差异较大, 该比值还避免了因身体大小差异而需进行标准化时产生的难题。

“相对胫骨硬度”的计算方法如下: 应用原始胫骨和肱骨中段极惯性矩计算。若两侧骨平均可测, 则胫骨相对极惯性矩可应用方程 $[(\text{左胫骨 } J + \text{右胫骨 } J)/2]/[(\text{左肱骨 } J + \text{右肱骨 } J)/2]$ 计算获得; 若仅一侧可用, 则应用单侧进行计算(胫骨 J /肱骨 J)。

2.4 CSG 参数的标准化

以往研究指出, 个体大小体重差异会对骨骼力学分析产生直接影响。为了消除这种影响, 应当对 S_i 、 I_{\max} 、 I_{\min} 和 J 进行标准化处理。较好的标准化参照值是体重 (body mass, m) 和肢骨最大长 (maximum length, L_{\max})^[43, 45]。体重可由股骨头垂直径 (femoral head diameter, D) 或者髋骨最大宽 (maximum pelvic, W_{\max}) 估算。由于鲤鱼墩人骨未能

表 2 对比组基本信息
Tab.2 The basic information of control groups

对比组 Control group	例数 Sample (n)	样本 Specimen	骨骼样本 Bone
南方古猿	1	AL333-61 ^[56] .	股骨
能人	1	OH 62 ^[56] .	股骨
直立人	5	KNM-ER 1481, 1808 ^[56] , BOU VP 2/15 ^[56] , BOU VP 19/63 ^[56] ; 北京人 1 号 ^[56]	股骨
尼安德特人	9	La Ferrassie 1 ^[46,56] , La Chaise ^[56] , La Chapelle 1 ^[46,56] ; Fond-de-Forêt ^[46] ; Neanderthal 1 ^[56] ; Tabun 1 ^[46] , 3 ^[46,56] , Spy 2 ^[46,56] , Shanidar 5 ^[56]	肱骨, 股骨, 胫骨
晚期智人 (化石)	39	Skhül 4 ^[46] , 5 ^[46,56] , 7 ^[56] ; Qafzeh 8, 9 ^[46,56] ; Paviland 1 ^[46,56] ; Cro-Magnon 4322, 4323 ^[56] ; 肱骨, 股骨, Willendorf ^[56] ; Grotte des Enfants 4 ^[46] ; Dolni Vestonici 13, 14, 16 ^[46] ; Gough's Cave 1 ^[46] ; Neussing 1 ^[46] ; Obercassel 1 ^[46] ; Romanelli 1 ^[46] ; Romito 3 ^[46] ; Veyrier 1 ^[46] ; Wadi Halfa 2, 3, 24, 26, 31, 37 ^[46] ; Jebel Sahaba 21, 29, 38, 39, 40, 42 ^[46] ; Afalou 2, 13, 25, 27, 28 ^[46] ; El Wad 10259, 10260, 10263 ^[46]	胫骨
全新世人类	99	江苏高资全新世智人 TW1-01, TW1-02 ^[44] ; 石器时代晚期南非人 16 人 [*] ; 原史安 肱骨, 股骨, 达曼岛人 15 人 [*] ; 陕西南北朝时期个体 1 人 [*] ; 剑桥大学当代职业游泳运动员 15 人 [*] , 职业长跑运动员 15 人 [*] , 职业曲棍球运动员 15 人 [*] , 对照组 20 人 [*]	胫骨
黑猩猩	1	现代样本 ^[56]	股骨

* 为本文原始数据。

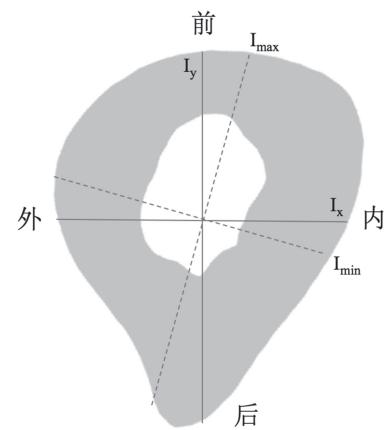


图 4 主要截面几何参数示例 (03SL-M7 左侧股骨 50% 位置截面上面观)
Fig. 4 The main sectional geometric parameters (the 50% upper view of the cross-sectional area of 03SL M7 left femur)

left femur)

保存较好的髋骨，因此本文应用股骨头垂直径来进行体重估算^[49]，具体公式如下：

- a. $m=2.239D-39.9$ ^[50]；
- b. $m=2.268D-36.5$ ^[51]；
- c. $m=2.741D-54.9$ (males)； $m=2.426D-35.1$ (females)^[52]。

根据 Nikita 等的相关研究，应用公式 c 计算所得的体重值应再乘以 10%，然后用原始值减去该乘积，所得值为最后的体重估计值。某个体的最终体重应为上述三种方法所得数值的均值^[53]。

骨骼力学参数的具体标准化处理方法如下^[43]：

$S=S_t/m$ ； S 为 S_t 的标准化值。

$I_{sa}=I_{\max}/mL_{\max}^2$ ； I_{sa} 表示 I_{\max} 的标准化值。

$I_{si}=I_{\min}/mL_{\max}^2$ ； I_{sa} 表示 I_{\max} 的标准化值。

$J_s=J/mL_{\max}^2$ ； J_s 表示 J 的标准化值。

2.5 长骨横截面形态比较和非对称性分析

对鲤鱼墩遗址个体以及其他不同进化阶段人类的股骨中部（50%）横截面形态进行比较，以便考察他们在股骨中部横截面形态上的差异。因为本文重点考察的是骨骼生物力学参数的差异，因此未对骨干“前后径 / 内外径”等比率进行比较和分析。本次研究也仅限于对股骨中部总横截面形态的考察，没有进一步对内部的密质骨区横截面形态和髓腔横截面形态进行比较。

应用“方向非对称性百分比”（Percentage directional asymmetries, λ ）来评估个体左右侧上、下肢骨对称性和发育差异。具体公式为：

$$\lambda=(K_r-K_l)/K \times 100$$

K_r —骨骼力学参数右侧值， K_l —骨骼力学参数左侧值， K —骨骼力学参数左右侧值均值；若 λ 为正值，表明某个体的右侧发育优势，反之为左侧发育优势^[54-55]。

2.6 对比组信息和统计学分析方法

本文所使用的对比组数据，除注明出处者外，均为原始数据，具体信息见表 2。鉴于不同群体样本量的差异、对比内容不同以及可获取的骨骼生物力学参数的不同，根据对比需要，本文分别引用之。应用最小二乘回归法，获得全新世人群骨骼生物力学参数的相关一元回归方程。对所获的一元回归方程中的斜率进行比较，以便考察这些人群相关参数分布趋势的差异。统计学软件为 IBM[®] SPSS[®] Statistics for Mac 21.0 版本和 Microsoft[®] Excel[®] for Mac 2011。

3 结 果

本文获取的 5 个个体骨骼生物力学参数和 λ 值的结果详见表 3-6。鲤鱼墩遗址人类长骨中部（50%）总横截面形态见图 5，不同进化阶段人类股骨中部（50%）总横截面形态见图 6。

3.1 鲤鱼墩遗址个体间的比较

3.1.1 骨骼生物力学参数的比较

表 3 显示的是鲤鱼墩遗址个体肱骨生物力学基本信息。在可比较的两例个体中，

表3 鲤鱼墩遗址个体肱骨生物力学基本信息

Tab.3 The basic humerus biomechanical information of the Liyudun individuals

个体 Individual	性别 Sex	位置 Location	侧别 Side	最大长 L_{\max} (mm)	体重 m (kg)	横截面总面积 S_t	最大截面惯性矩 I_{\max}	最小截面惯性矩 I_{\min}	极惯性矩 J	最大与最小截面惯性矩之比 I_{\max}/I_{\min}
03SL M3	男	35%	左	291.02	—	—	—	—	—	1.40
03SL M3	男	50%	左	291.02	—	—	—	—	—	1.25
03SL M6	男	35%	左	326.00	52.03	3.67	6.230	4.650	10.879	1.34
03SL M6	男	50%	左	326.00	52.03	3.98	9.659	4.492	13.174	1.93
03SL M7	女	35%	左	281.00	48.75	3.76	6.761	6.262	13.023	1.08
03SL M7	女	35%	右	281.00	48.75	2.91	7.347	7.070	14.417	1.04
03SL M7	女	50%	左	281.00	48.75	3.76	9.659	5.382	15.040	1.79
03SL M7	女	50%	右	281.00	48.75	3.21	11.035	6.683	17.719	1.65

注: 03SL M7 左侧肱骨最大长以其右侧肱骨最大长值为参照。为了便于阅读和直观比较, 除“最大与最小截面惯性矩之比”依据原始值计算外, 表中其余各项生物力学参数值均为“标准化值”乘以 10000 所得结果, 表 4 和表 5 同此

表4 鲤鱼墩遗址个体股骨生物力学基本信息

Tab.4 The basic femur biomechanical information of the Liyudun individuals

个体 Individual	性别 Sex	位置 Location	侧别 Side	最大长 L_{\max} (mm)	体重 m (kg)	横截面总面积 S_t	最大截面惯性矩 I_{\max}	最小截面惯性矩 I_{\min}	极惯性矩 J	最大与最小截面惯性矩之比 I_{\max}/I_{\min}
03SL M5	男	50%	左	461.00	55.70	9.20	27.748	19.680	47.428	1.41
03SL M5	男	50%	右	461.00	55.70	10.10	28.838	19.859	48.697	1.45
03SL M6	男	50%	左	434.24	52.03	9.15	27.099	14.404	41.503	1.88
03SL M7	女	50%	左	425.90	48.75	8.37	21.050	13.349	34.399	1.58
03SL M7	女	50%	右	425.90	48.75	9.08	22.311	15.095	37.406	1.48

注: 除“最大与最小截面惯性矩之比”依据原始值计算外, 表中各项生物力学参数值均为标准化值

女性 03SL-M7 左侧肱骨 35% 位置的横截面总面积稍大于男性 03SL-M6 的, 其左侧肱骨 50% 位置的横截面总面积稍小于 03SL-M6 的。03SL-M7 左侧肱骨 35% 位置的最大和最小截面惯性矩均稍大于 03SL-M6 的, 而其左侧肱骨 50% 位置的最大和最小截面惯性矩稍大于或等于 03SL-M6 的。03SL-M7 左侧肱骨 35% 位置和 50% 位置的极惯性矩都稍大于 03SL-M6 的。总体而言, 女性 03SL-M7 在上述骨骼生物力学参数值上稍大于男性 03SL-M6 的。

就最大与最小截面惯性矩之比而言, 有三个个体可供比较, 即 03SL-M3、03SL-M6 和 03SL-M7。依据表 2 可知, 在两例男性个体中, 03SL-M3 左侧肱骨 35% 位置的比值稍大于 03SL-M6 的, 但 03SL-M3 左侧肱骨 50% 位置的比值却明显小于 03SL-M6 的。若三例个体一同考察, 03SL-M6 左侧肱骨 50% 位置的比值最大, 03SL-M7 的居次, 03SL-M3 的明显小于另外两例个体的。

表 4 显示的是鲤鱼墩遗址个体股骨生物力学基本信息。在可比较的三例个体中, 男性 03SL-M5 股骨 50% 位置的横截面总面积稍大于 03SL-M6 的, 而他们又明显大于 03SL-M7 的。在最大和最小截面惯性矩以及极惯性矩的比较中也显示了近似的结果, 只是 03SL-M7 右侧 50% 位置的最小截面惯性矩稍大于 03SL-M6 的。总体而言, 男性股骨 50% 位置的骨骼生物力学参数明显大于女性 03SL-M7 的。最大与最小截面惯性矩之比则显示了与上述不同的结果, 03SL-M6 的比值最大, 03SL-M7 的居次, 03SL-M5 的最小。

表 5 显示的是鲤鱼墩遗址个体胫骨生物力学基本信息。在可比较的三例个体中,

表 5 鲤鱼墩遗址个体胫骨生物力学基本信息

Tab.5 The basic tibia biomechanical information of the Liyudun individuals

个体 Individual	性别 Sex	位置 Location	侧别 Side	最大长 L_{\max} (mm)	体重 m (kg)	横截面总面积 S_t	最大截面惯性矩 I_{\max}	最小截面惯性矩 I_{\min}	极惯性矩 J	最大与最小截面惯性矩之比 I_{\max}/I_{\min}
03SL M3	男	50%	右	—	—	—	—	—	—	3.09 *
03SL M4	男	50%	—	—	—	—	—	—	—	2.18 *
03SL M5	男	50%	左	383.24	55.70	8.52	36.127	13.953	50.080	2.59
03SL M5	男	50%	右	383.24	55.70	9.01	37.672	14.754	52.426	2.55
03SL M6	男	50%	左	369.18	52.03	6.30	19.697	8.704	28.401	2.26
03SL M7	女	50%	左	341.50	48.75	6.25	27.643	12.561	40.204	2.20
03SL M7	女	50%	右	346.20	48.75	6.99	25.646	11.580	37.226	2.21

注：除“最大与最小截面惯性矩之比”依据原始值计算外，表中各项生物力学参数值均为标准化值。“*”表示的是根据骨骼形态和骨性标志所确定的截面位置而获取的估计值

表 6 鲤鱼墩遗址个体方向非对称性百分比 (R) 值结果Tab.6 The percentage directional asymmetries (R) values of the Liyudun individuals

个体 Individual	性别 Sex	位置 Location	骨骼 Bone	横截面总面积比值 λ_t	极惯性矩比值 λ_J
03SL M5	男	50%	股骨	9.34	2.64
03SL M5	男	50%	胫骨	5.61	4.68
03SL M7	女	35%	肱骨	-25.57	10.16
03SL M7	女	50%	肱骨	-19.88	16.35
03SL M7	女	50%	股骨	8.18	8.37
03SL M7	女	50%	胫骨	11.15	-4.96

03SL-M5 胫骨 50% 位置的生物力学参数均明显大于其他两例个体的，03SL-M7 的居次，03SL-M6 的最小。在最大与最小截面惯性矩之比的比较中，有 5 例个体可供比较。总体而言，男性的比值大于女性的比值，唯男性 03SL-M4 的比值略小于女性 03SL-M7 的。男性个体中，03SL-M3 具有最大的比值，03SL-M5 的居次，03SL-M6 稍次，03SL-M4 的比值最小。这表明男性个体间的胫骨在抗弯曲能力上有一定的差异。

3.1.2 鲤鱼墩遗址人类胫骨左、右侧对称性比较

本次可供比较的样本仅有男性 03SL-M5 和女性 03SL-M7（表 6）。其中，03SL-M5 仅股骨和胫骨参数可供计算和比较，03SL-M7 则有双侧的肱骨、股骨和胫骨参数可供计算和比较。03SL-M5 无论是股骨还是胫骨，都表现出右侧优势。03SL-M7 个体上肢横截面总面积的 λ 值反映出来的是左侧优势，但极惯性矩的 λ 值则反映出较为显著的右侧优势；其下肢横截面总面积的 λ 值反映出来的是右侧优势，股骨极惯性矩的 λ 值也反映出显著的右侧优势，但胫骨极惯性矩的 λ 值则反映出较为显著的左侧优势。

3.2 股骨中部总横截面的比较

3.2.1 鲤鱼墩遗址个体间的比较

从图 5 中显示的 03SL-M7 左、右侧肱骨横截面总面积来看，左侧肱骨的稍大于右侧的，总体上左侧肱骨的前后径略大于右侧的，但内外径相差较小。03SL-M7 的左侧肱骨

与 03SL-M6 和 03SL-M3 左侧肱骨相比, 其前后径明显小于 03SL-M6 的, 但明显大于 03SL-M3 的; 三者当中, 03SL-M7 和 03SL-M6 的内外径相差较小, 但显著大于 03SL-M3 的内外径。03SL-M3 的左侧肱骨横截面总面积是三者中最小的。

在股骨的比较中, 03SL-M5 和 03SL-M7 均有双侧可以比较, 03SL-M6 仅有左侧的可供对比。总体上, 03SL-M5 的横截面总面积最大, 03SL-M7 的最小。较其他两个个体而言, 03SL-M5 股骨的总横截面形态更偏向圆形。

可比较的胫骨横截面相对较多。可以看出, 03SL-M6 和 03SL-M2 的横截面形态相对短宽, 03SL-M7 的相对狭长, 而 03SL-M5、03SL-M4 和 03SL-M3 的则明显为狭长型。后三者的横截面总面积也明显大于前者的, 其中 03SL-M6 的明显最小。

3.2.2 不同进化阶段人类的比较

依据图 6 显示的结果, 包括鲤鱼墩遗址个体在内的大部分晚期智人的股骨中部总横截面形态为狭长型; 能人 OH 62、直立人个体、尼安德特人、高资人以及陕西唐代人的多趋近圆型; 相对早期的人科成员中南方古猿阿法种 AL333-61 的相对狭长; 现代黑猩猩的则为典型的扁型。

就股骨中部横截面总面积大小而言, 晚期智人阶段的化石人类明显大于其他个体。鲤鱼墩遗址个体中 03SL-M6 和 03SL-M7 相对于其他个体属于较小者, 而 03SL-M5 则与除晚期智人阶段化石人类外的其他个体相近。03SL-M5 的股骨中部横截面形态相对于 03SL-M6 和 03SL-M7 的而言, 虽然也表现为狭长型特征, 但更趋向于短宽的形态。03SL-M5 股骨中部的横截面总面积也明显大于 03SL-M6 和 03SL-M7 的。

3.3 全新世人群骨骼生物力学参数的比较

将鲤鱼墩遗址个体与剑桥大学当代职业运动员和全新世渔猎—采集人群的骨骼生物力学参数进行比较, 以考察这些人群在相关活动强度和方式上的差异(图 7)。考虑到上下肢长骨的受力特点, 肱骨分左右侧进行比较, 而胫骨则不区分侧别。

图 7A 显示了这些人群左侧肱骨中部横截面总面积和极惯性矩分布的二维散点图。当代职业长跑运动员拟合度不高($R^2=0.388$), 表明这些个体的左侧肱骨具有相对较

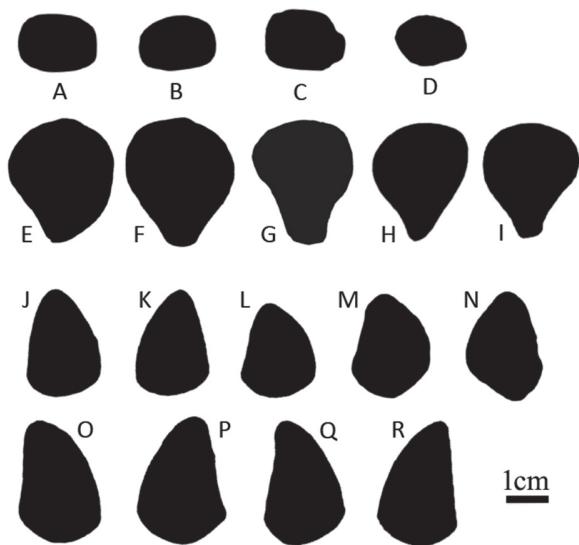


图 5 鲤鱼墩遗址人类长骨中部 (50% 位置) 横截面形态

Fig. 5 The cross sectional area of 50% position of human long bones of The Liyudun site

A. 03SL M7 左肱骨; B. 03SL M7 右肱骨; C. 03SL M6 左肱骨; D. 03SL M3 左肱骨; E. 03SL M5 左股骨; F. 03SL M5 右股骨; G. 03SL M6 左股骨; H. 03SL M7 左股骨; I. 03SL M7 左股骨; J. 03SL M7 左胫骨; K. 03SL M7 右胫骨; L. 03SL M6 左胫骨; M. 03SL M2 左胫骨; N. 03SL M2 右胫骨; O. 03SL M5 左胫骨; P. 03SL M5 右胫骨; Q. 03SL M4 左胫骨; R. 03SL M3 右胫骨

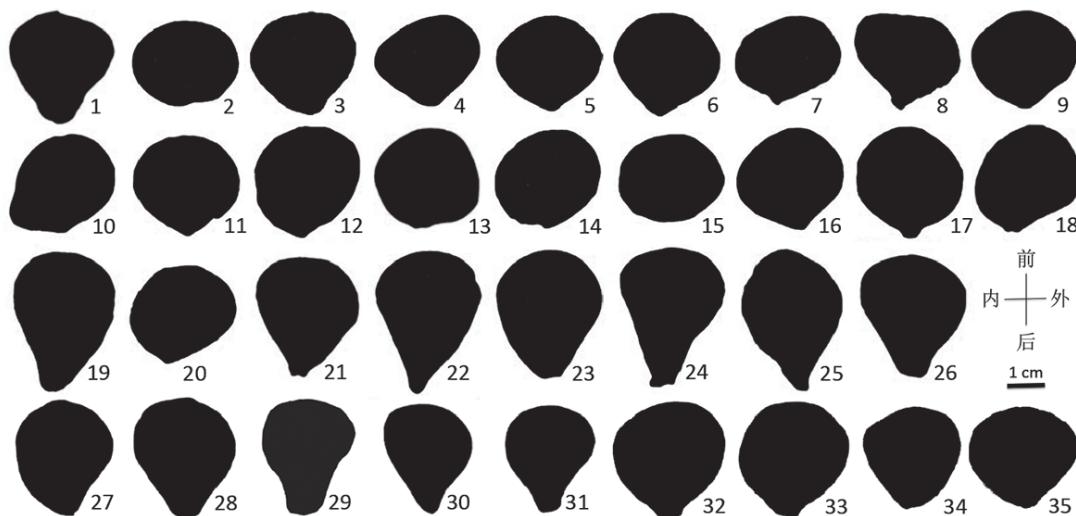


图 6 不同进化阶段人类的股骨中部 (50%) 横截面形态比较

Fig. 6 The cross sectional area of 50% position of different individuals in different evolutionary phases

1. 南方古猿阿法种 AL333-61; 2. 现代黑猩猩; 3. 能人 OH 62; 4. 直立人 KNM-ER 1481; 5. 直立人 KNM-ER 1808; 6. 直立人 KNM-WT 15000; 7. 直立人 BOU VP 2/15; 8. 直立人 BOU VP 19/63; 9. 北京直立人 1 号; 10. 尼安德特人 Ferrassie 1; 11. 尼安德特人 La Chaise; 12. 尼安德特人 Neanderthal 1; 13. 尼安德特人 La Chapelle 1; 14. 尼安德特人 Tabun 3; 15. 尼安德特人 Tabun 1; 16. 尼安德特人 Spy 2; 17. 尼安德特人 Shanidar 5; 18. 尼安德特人 Fond-de-Forêt; 19. 晚期智人 Skhūl 5; 20. 晚期智人 Skhūl 7; 21. 晚期智人 Qafzeh 9; 22. 晚期智人 Qafzeh 8; 23. 晚期智人 Paviland 1; 24. 晚期智人 Cro-Magnon 4323; 25. 晚期智人 Cro-Magnon 4322; 26. 晚期智人 Willendorf; 27. 鲤鱼墩 03SL M5 左; 28. 鲤鱼墩 03SL M5 右; 29. 鲤鱼墩 03SL M6 左; 30. 鲤鱼墩 03SL M7 左; 31. 鲤鱼墩 03SL M7 右; 32. 江苏高资全新世智人 TW1-01; 33. 江苏高资全新世智人 TW1-02; 34. 陕西南北朝时期个体左; 35. 陕西南北朝时期个体右

大离散性; 当代职业曲棍球运动员趋势线具有相对较低的拟合度 ($R^2=0.505$) ; 其他人群则具有较好的拟合度 ($R^2>0.700$) 。总体而言, 这些群体的分布趋势相类似 (斜率分布为 4.533~7.323) , 其中原史安达曼岛人具有最高斜率值 (男性为 7.323, 女性为 6.540) , 当代职业长跑运动员的斜率值最小 (4.533) 。

从两种参数分布的情况来看, 他们大致分成了两个不同的组群。第一组群包括了当代剑桥大学三类职业运动员和原史安达曼岛人男性, 他们具有相对较高的横截面总面积和极惯性矩, 表明这些个体具有较高的抗压和抗扭转载荷的能力。第二组群包括了原史安达曼岛人女性、石器时代晚期南非人以及鲤鱼墩遗址的 03SL-M7 和 03SL-M6, 他们具有相对较小的横截面总面积和极惯性矩。03SL-M7 与原史安达曼岛人的分布较为一致, 而 03SL-M6 与石器时代晚期南非人的分布趋势较为接近。可以看出, 鲤鱼墩遗址的这两例个体在第二组群当中具有相对较高的参数值, 表明其肱骨中部的抗扭转载荷能力相对较高。

图 7B 显示了这些人群左侧肱骨中部最大和最小截面惯性矩分布的二维散点图。当代职业游泳运动员趋势线拟合度较低 ($R^2=0.273$) , 表明这些个体的左侧肱骨具有相对较大离散性; 当代职业长跑运动员和当代职业曲棍球运动员趋势线具有相对较低的拟合度 (分别为 $R^2=0.432$ 和 0.568) ; 其他人群则具有较好的拟合度 ($R^2>0.628$) 。总体而言, 这些群体的分布趋势相类似 (斜率分布为 0.437~0.620) , 其中当代职业曲棍球运动员具有最高斜率值 (0.620) , 当代职业游泳运动员的斜率值最小 (0.437) 。

从两种参数分布的情况来看,他们也大致分成了两个不同的组群。第一组群同样包括了当代剑桥大学三类职业运动员和原史安达曼岛人男性。虽然当代三类职业运动员的最大和最小截面惯性矩的分布均较为分散,但总体上是所有人群中最高的,表明他们的最大和最小弯曲载荷能力相对较高。第二组群包括了原史安达曼岛人女性、石器时代晚期南非人以及鲤鱼墩遗址的03SL-M7和03SL-M6。他们具有相对较小的最大和最小截面惯性矩。03SL-M7和03SL-M6与原史安达曼岛人女性以及石器时代晚期南非人女性的分布较为一致,而且鲤鱼墩遗址的这两例个体处于两个女性群体分布的上限,表明这两例个体的左侧肱骨具有相对较高的弯曲载荷能力。

图7C显示了这些人群右侧肱骨中部横截面总面积和极惯性矩分布的二维散点图。与左侧肱骨所显示的结果类似,当代职业长跑运动员趋势线拟合度不高($R^2=0.346$),表明

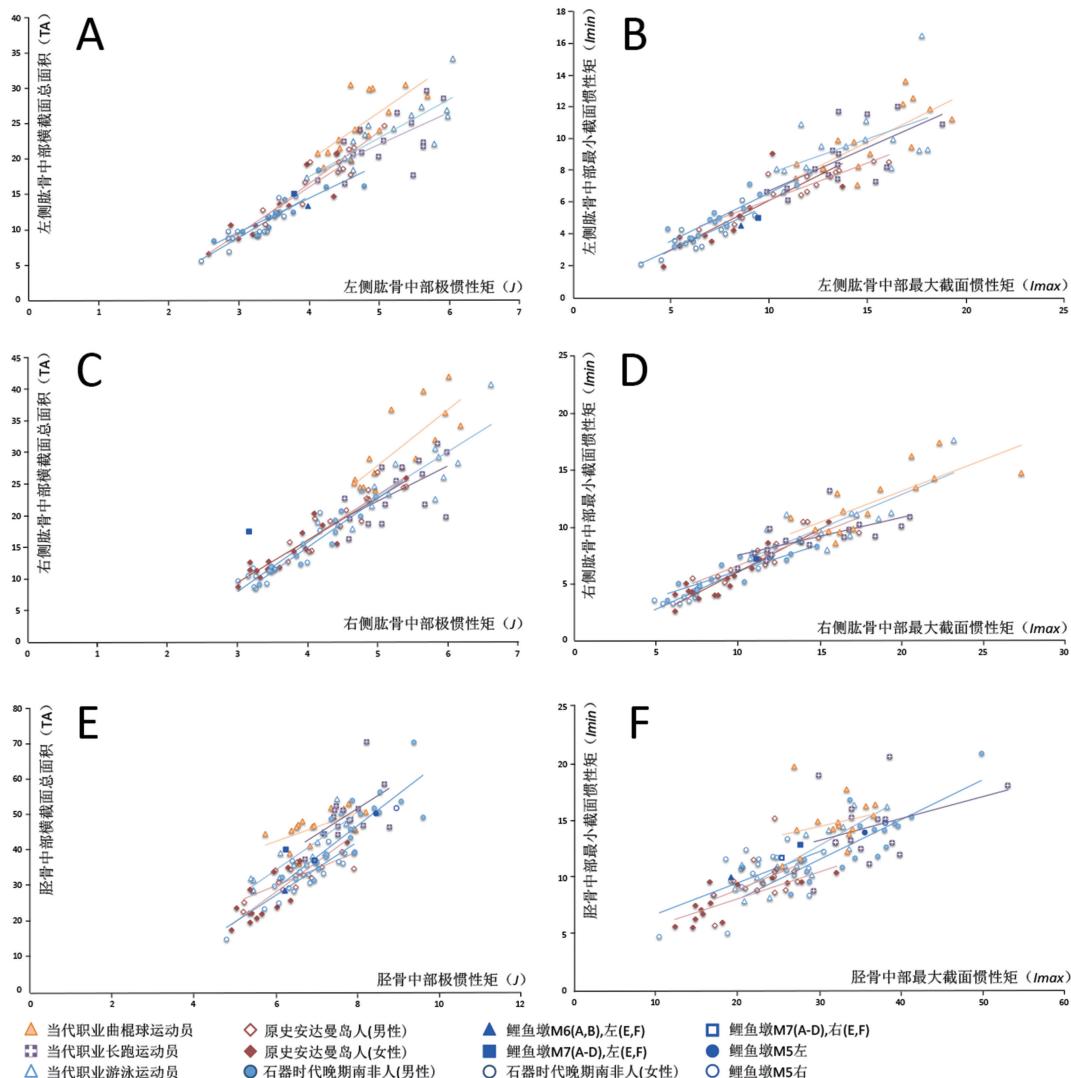


图7 全新世人群骨骼生物力学参数的比较
Fig.7 The comparison of S , J , $Imax$ and $Imin$ among Holocene human groups

这些个体的左侧肱骨具有相对较大离散性；当代职业曲棍球运动员趋势线具有相对较低的拟合度 ($R^2=0.619$)；其他人群则具有较好的拟合度 ($R^2>0.700$)。总体而言，除了当代职业曲棍球运动员的斜率值最高 (8.863)，当代职业长跑运动员的斜率值较小 (5.588) 外，其他群体的总体分布趋势相类似 (斜率分布为 6.732~7.790)。

从两种参数分布的情况来看，他们仍然大致分成了两个不同的组群，但没有左侧显现的那样明显。第一组群包括了当代剑桥大学的三类职业运动员，其中曲棍球运动员仍然具最高的横截面总面积和相对较高的极惯性矩，表明他们具有较高的抗压和扭转载荷的能力。第二组群包括了原史安达曼岛人、石器时代晚期南非人和鲤鱼墩遗址的 03SL-M7。他们具有相对较小的横截面总面积和极惯性矩。03SL-M7 所表现出来的情形与左侧的明显不同，即相对远离于其他群体。可以看出，03SL-M7 在所有对比人群中，其极惯性矩相对较小，但横截面总面积却处于第二组群的中间水平。此外，当代职业长跑运动员的右侧肱骨中部横截面总面积相对较小，但仍具有相对较大的极惯性矩。

图 7D 显示了这些人群右侧肱骨中部最大和最小截面惯性矩分布的二维散点图。当代长跑运动员和职业曲棍球运动员趋势线拟合度相对较低 (分别为 $R^2=0.439$ 和 0.575)，其他人群则具有较好的拟合度 ($R^2>0.682$)。总体而言，除了当代职业长跑运动员和石器时代晚期南非人男性外 (斜率分别为 0.332 和 0.463)，其他群体的分布趋势相类似 (斜率分布为 0.551~0.747)，其中原史安达曼人女性具有最高斜率值 (0.747)。

从两种参数分布的情况来看，他们也大致分成了两个不同的组群。第一组群仍然同样包括了当代剑桥大学三类职业运动员和原史安达曼岛人男性。同左侧的相类似，这些当代职业运动员的最大和最小截面惯性矩的分布均较为分散，但总体上是所有人群中最高的，表明他们的最大和最小弯曲载荷能力相对较高。第二组群包括了原史安达曼岛人女性和石器时代晚期南非人，他们具有相对较小的最大和最小截面惯性矩。03SL-M7 处于两个组群的交错区域，但其参数值明显小于第一组群个体，与石器时代晚期南非人、当代职业长跑运动员以及原史安达曼岛人最为接近。

图 7E 显示了这些人群胫骨中部横截面总面积和极惯性矩分布的二维散点图。胫骨所显示的两种参数分布特点与肱骨所表现的稍有不同，即这些人群胫骨极惯性矩值相对集中，不似肱骨所表现的那样分散。当代职业长跑运动员和曲棍球运动员趋势线拟合度相对较低 (分别为 $R^2=0.289$ 和 0.353)，表明这些个体的左侧肱骨具有相对较大离散性，其他人群则具有相对较好的拟合度 ($R^2>0.640$)。总体而言，石器时代晚期南非人男性的斜率值最高 (8.869)，当代职业曲棍球运动员的斜率值较小 (4.075)。

从两种参数分布的情况来看，虽然这些群体的极惯性矩值相对收敛，但他们仍然大致分成了两个不同的组群。与肱骨的情况有所不同的是，第一组群包括了当代职业长跑运动员、曲棍球运动员、石器时代晚期南非人男性和鲤鱼墩遗址 03SL-M5。这四个群体的个体在横截面总面积方面相差不大，但长跑运动员和部分石器时代晚期南非人男性在极惯性矩值方面明显高于曲棍球运动员，03SL-M5 的极惯性矩则处于较高水平。第二组群包括了当代职业游泳运动员、原史安达曼岛人、石器时代晚期南非人女性以及鲤鱼墩遗址的 03SL-M7 和 03SL-M6。他们具有相对较小的横截面总面积和极惯性矩。就横截面总面积而言，03SL-M7 的在该组群中相对较高，03SL-M6 的属于中等水平；就极惯性矩而言，

03SL-M7 和 03SL-M6 的均属于中等水平。03SL-M7 个体左、右测胫骨中部极惯性矩表现出不一致的分布, 左侧的更趋向于当代职业游泳运动员和曲棍球运动员, 而右侧的更趋向石器时代晚期南非人男性的下限。03SL-M6 则更趋向于石器时代晚期南非人女性和原史安达曼岛人女性群体。

图 7F 显示了这些人群胫骨中部最大和最小截面惯性矩分布的二维散点图。除了当代职业长跑运动员、石器时代晚期南非人男性和原史安达曼岛人女性的趋势线拟合度相对较高外 (分别为 $R^2=0.740$, 0.684 和 0.653), 其他人群的拟合度较差 ($R^2<0.350$), 表明这些群体在两项参数的分布上较为离散。总体而言, 除了当代职业游泳运动员和石器时代晚期南非人男性外 (斜率分别为 0.409 和 0.351), 其他群体的分布趋势相类似 (斜率分布为 0.162~0.294)。

从两种参数分布的情况来看, 他们也大致分成了两个不同的组群。第一组群包括当代剑桥大学三类职业运动员、原史安达曼岛人男性个体和鲤鱼墩遗址 03SL-M5。这五类群体的最大和最小截面惯性矩的分布相对较为集中, 总体上是所有人群中最高的, 表明他们的最大和最小弯曲载荷能力相对较高。第二组群中也包括了部分当代职业游泳运动员, 其他人群则有石器时代晚期南非人女性、原史安达曼岛人以及鲤鱼墩遗址的 03SL-M7 和 03SL-M6。第二组群的个体具有相对较小的最大和最小截面惯性矩。03SL-M7 明显处于两个组群的交错区域, 但其参数值明显小于第一组群个体, 与当代职业曲棍球运动员、当代职业游泳运动员以及石器时代晚期南非人女性的上限最为接近。

3.4 相对胫骨硬度的比较

不同人群相对胫骨硬度的比较结果见图 8。可以看出, 石器时代晚期南非人具有最大的相对胫骨硬度, 剑桥大学当代职业游泳运动员具有最小的相对胫骨硬度。鲤鱼墩群体总体上与当代职业长跑运动员和原史安达曼岛人最为接近。男性 03SL-M6 与剑桥大学当代长跑运动员的均值相近, 而男性 03SL-M3 介于原史安达曼岛人和职业游泳运动员之间。很有意思的是, 女性 03SL-M7 具有最高的相对胫骨硬度, 超过了大部分群体的上限, 但明显低于石器时代晚期南非人的。

3.5 胳骨和胫骨中部极惯性矩两项特征的比较

应用肱骨和胫骨中部极惯性矩两项特征进行的人群间比较结果见图 9。可以看出, 在可比较的三个个体中, 男性 03SL-M3 与当代职业游泳运动员的分布趋势较为一致, 男性 03SL-M6 与原史安达曼岛人的分布趋势一致, 而女性 03SL-M7 介于石器时代晚期南非人和原史安达曼岛人之间。但不难看出, 处于鲤鱼墩遗址早期的 03SL-M7 和 03SL-M6, 其肱骨和胫骨强度均大于原史安达曼岛人群而小于石器时代晚期南非人群; 而处于该遗址晚期的 03SL-M3, 其肱骨和胫骨强度已超过了大部分石器时代晚期南非人, 尤以上肢的肱骨最为明显。

石器时代晚期南非人显示的较高斜率值反映了其胫骨硬度较肱骨硬度有着更大的增长; 反之, 原史安达曼岛人的斜率值最低, 表明其胫骨硬度的发育相对弱些^[46]。化石人类的肱骨中部极惯性矩值没有超过现代人的分布范围, 但其却有着较高的胫骨中部极惯性矩值, 表明其有较强的胫骨硬度。剑桥大学当代对照组分布于所有人群的中间位置。当代

对照组的分布趋势与当代职业游泳运动员的较为一致, 只是对照组的胫骨硬度略高于当代职业游泳运动员的。

4 讨 论

从现有的结果看, 虽然鲤鱼墩遗址个体之间在骨骼发育水平和应力表现上存在差异, 但总体上与已知的渔猎—采集型人群以及当代职业游泳运动员和长跑运动员的表现较为一致。综合鲤鱼墩遗址个体肱骨、股骨和胫骨的骨骼生物力学信息, 结合以往有关鲤鱼墩个体肢骨的研究结果, 对该群体内个体间长骨的发育水平和活动强度进行对比。希望通过对比与分析, 讨论鲤鱼墩个体骨骼力学特点的可能成因或其可能的行为模式, 在此基础上探讨鲤鱼墩遗址史前人类的生业方式。

4.1 鲤鱼墩遗址史前人类的个体差异

4.1.1 上肢骨的比较

本次研究发现, 女性 03SL-M7 肱骨的前后径明显小于男性 03SL-M6 的, 二者的内外径相差较小, 但其骨骼生物力学参数稍大于 03SL-M6 的。以往研究也表明 03SL-M7 肱骨滋养孔的发育强于男性, 03SL-M6 的肱骨粗壮指数低于现已发现的其他新石器时代的男性肱骨的粗壮指数^[31]。本文结果也显示, 03SL-M6 左侧肱骨中部最大与最小截面惯性矩之比大于 03SL-M7 的, 说明 03SL-M6 左侧肱骨抗弯曲能力更强。男性 03SL-M3 肱骨虽然显示出了一定的骨干粗壮性, 但其中部的前后径、内外径、横截面总面积以及最大与最小截面惯性矩之比是可比较的三个个体中最小。这些结果说明该个体上肢较为发育, 反映出相对较强的上肢运动水平, 但其抗弯曲能力相对较弱。在智人群体肱骨和胫骨中部极惯性矩比较中, 03SL-M3 与当代职业游泳运动员的分布趋势较为一致, 或许表明其更善于进行类似游泳的行为。

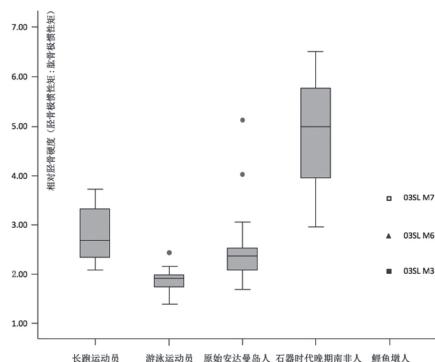


图 8 不同人群相对胫骨硬度的比较

Fig.8 The comparison of relative tibial rigidity among groups

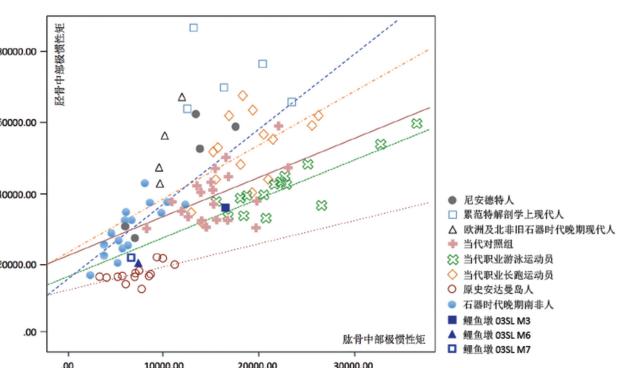


图 9 智人群体肱骨和胫骨中部极惯性矩的比较

Fig.9 The bivariate plot of tibial rigidity (J) versus humeral rigidity (J) for different *Homo Sapiens* groups

4.1.2 下肢骨的比较

以往研究认为运动量相对较小者的股骨中部形态多呈圆型，扁胫型胫骨通常被认为与频繁的奔跑、跳跃或者蹲踞有关^[57-59]。但也有研究认为，股骨中部外围形态及其粗壮程度与生业方式之间并无完全的一致性^[57]。在骨骼生物力学分析中，许多文化、自然环境以及生物体本身等因素对长骨外部几何形态所造成的影响还很难被估计，因此活动行为方式并非是唯一对长骨横截面强度和形态产生影响的因素。即便如此，基于长骨总横截面形态的历时性分析，该形态及其相关比值仍是进行人群间活动方式差异性分析的有效工具^[43]。

从本文的情况来看，总体上 03SL-M5 股骨的横截面总面积最大，03SL-M7 的最小。较 03SL-M7 和 03SL-M6 而言，03SL-M5 股骨的总横截面形态更偏向圆形，但仍具有狭长的形态特征；而前两者的总横截面形态却为典型的狭长型。就胫骨而言，03SL-M6 和 03SL-M2 的总横截面呈现了相对短宽的形态，而 03SL-M7、03SL-M5、03SL-M4 和 03SL-M3 的则明显为狭长型。后四者的横截面总面积也明显大于前二者的。上述下肢骨形态特征的共性和差异表明，多数鲤鱼墩遗址中的个体在前后方向上的受力较内外向强。

从生物力学参数比较结果看，男性股骨中部横截面总面积和极惯性矩明显大于女性 03SL-M7 的，表明男性的股骨具有更高的抗压和抗扭转能力。03SL-M6 股骨中部的最大与最小截面惯性矩之比最大，其次为 03SL-M7 的，03SL-M5 的最小，但后两者差异较小。这表明 03SL-M6 个体的股骨具有相对较高的抗弯曲能力，03SL-M7 的其次，而 03SL-M5 的相对较低。男性胫骨中部的最大与最小截面惯性矩之比总体上大于女性的，表明男性胫骨在抗弯曲能力方面高于女性的，而且男性个体间的胫骨在抗弯曲能力上有一定的差异。03SL-M5 胫骨中部生物力学参数均明显大于其他两例个体的，03SL-M7 的居次，03SL-M6 的最小。这些结果表明男性 03SL-M5 胫骨抗压和抗扭转能力相对较强。以往研究也表明，03SL-M5 的股骨的嵴指数远远高于其他各组的^[31]。

综合来看，男性 03SL-M5 下肢的抗压和抗扭转能力相对较强，但其抗弯曲能力相对较弱。结合 03SL-M5 股骨中部的总横截面形态更偏向圆形，其胫骨中部的总横截面形态为扁胫型，表明其更可能进行相对较多的奔跑或跳跃运动而非从事某些长期负重的活动。男性 03SL-M6 的下肢在抗弯曲能力上是相对较强的，但其在抗压和抗扭转力方面并不突出。在肱骨中部极惯性矩和胫骨中部极惯性矩比较中，03SL-M6 与原史安达曼人的分布趋势一致。结合 03SL-M6 股骨中部的总横截面为明显的狭长形态，其胫骨中部的总横截面形态则非扁胫型，说明该个体可能从事了相对较多的负重活动。

虽然女性 03SL-M7 具有较高的相对胫骨硬度，表明其下肢相对于其上肢而言，活动强度更大。但在整个鲤鱼墩遗址个体中，其下肢骨无论在抗压、抗扭转力还是抗弯曲力方面都不占优势，处于中等偏下的水平。以往研究表明，03SL-M7 胫骨指数处于女性对比组中的较低位置，仅高于兴隆洼组和贾湖组，显示出鲤鱼墩女性较窄的胫骨上部形态^[31]，这与本次的研究结果相一致。结合 03SL-M7 下肢骨中部总横截面形态特征以及骨骼生物力学参数，其更倾向于经常性陆地性活动而不是从事长期负重的活动。因此，较 03SL-M6 而言，03SL-M7 和 03SL-M5 可能具有更为相似的活动行为，只是 03SL-M5 具有更高的活动强度。

03SL-M5、03SL-M6 和 03SL-M7 个体均属于鲤鱼墩遗址第二期，早于距今 5,160 年；03SL-M3 和 03SL-M4 个体则属于鲤鱼墩遗址第三期，晚于距今 4,660 年。结合上述的个

体差异和时代差异，可以看出鲤鱼墩遗址第二期和第三期的这些个体在活动方式上虽然存在着一定差异的，但这些个体更趋向于典型的渔猎—采集人群。由于有限的样本，很难就此判断整个遗址两期人群是否总体上也具有这样的差异性。

4.1.3 左、右侧非对称性的讨论

有很多方法可以用来考察肢骨的左、右侧非对称性，例如不同部位关节面尺寸的统计学比较、骨干横截面积的几何形态测量学^[34, 60]或者肢骨形态测量学分析。肢骨左、右侧非对称性分析有助于我们了解更多的人类行为模式的细节。目前的肢骨非对称性分析则更加关注如何更好地利用骨骼生物力学方法，对个体和群体层面的双侧肢体的载荷方式，强度以及性别间的差异进行分析，藉此考察人群内部和人群间在行为模式以及生业方式等方面的差异^[61-64]。由于本次可供分析的样本较少，故还不能全面揭示鲤鱼墩遗址史前人类的肢骨对称性的一般特点，仅在个体水平上进行分析。

男性 03SL-M5 下肢在抗压和抗扭转能力相对较强，但其抗弯曲能力上相对较弱，总体表现出右侧优势，这可能与某种特定的行为方式有关。在与全新世人群的比较中，03SL-M5 也更接近于当代职业长跑运动员和石器时代晚期南非人男性。虽然女性 03SL-M7 左侧肱骨的横截面总面积稍大于右侧的，但生物力学参数却表明其右侧肱骨承受了相对较大的扭转力；其股骨反映出显著的右侧优势，但胫骨则反映出较为显著的左侧优势，说明其左侧胫骨承受了相对较大的扭转力。

4.2 有关鲤鱼墩遗址史前人类生业方式的探讨

作为对本文前面所提出问题的回应，即鲤鱼墩遗址史前人类是否营典型的渔猎—采集型生业方式？抑或正处于由渔猎—采集型向农业型生业方式转变的时期？本文将通过对包括鲤鱼墩遗址个体在内的不同时期人群长骨活动特点的讨论，来尝试进一步解答上述疑问。

以往研究表明，直立人和多数尼安德特人股骨中部总截面具有相对扁平的形态，晚期智人化石材则因为较为发育的股骨嵴而显示出狭长的形态^[44]。图 6 进一步显示了这种不同进化阶段人类个体间的差异。南方古猿阿法种 AL333-61 的股骨中部总横截面有别于其他化石人类；能人 OH 62、直立人个体、尼安德特人、高资人以及陕西唐代人的股骨中部横截面形态多数趋近圆型；包括鲤鱼墩遗址个体在内的大部分晚期智人的股骨中部横截面形态为狭长型；现代黑猩猩的股骨中部横截面形态则为典型的扁型。与高资人和唐代人相比，鲤鱼墩遗址个体的股骨中部总横截面呈狭长型，与其他晚期智人化石的相近；其横截面总面积小于高资人和唐代人。这样的形态特征可能说明了鲤鱼墩人群与多数目前已知的晚期智人化石人群在活动方式上有许多相似之处，但根据股骨嵴的发育程度来看，鲤鱼墩人群在活动强度上要弱于晚期智人化石人群，而强于其他化石人群以及高资人和陕西唐代人。就股骨中部横截面总面积大小而言，晚期智人阶段的化石人类明显大于其他个体。鲤鱼墩遗址个体中 03SL-M6 和 03SL-M7 相对于其他个体属于较小者，而 03SL-M5 则与除晚期智人阶段化石人类外的其他个体相近。

全新世人群骨骼生物力学参数的比较结果表明，当代剑桥大学三类职业运动员和原史安达曼岛人男性个体的肱骨中部具有相对较高的横截面总面积和极惯性矩以及最大和最小截面惯性矩，表明这些个体肱骨中部具有较高的抗扭转载荷以及抗最大和最小弯曲载荷的能力。而相对上述群体而言，原史安达曼岛人女性、石器时代晚期南非人以及 03SL-M7 和

03SL-M6，他们的肱骨具有相对较小的骨骼生物力学参数值。03SL-M7 和 03SL-M6 与石器时代晚期南非人和原史安达曼岛人的分布趋势相对接近，而且这两例个体较后两个群体而言，其肱骨中部的力学载荷能力相对较高。

就下肢骨而言，03SL-M5 胫骨中部的抗扭转载荷以及抗最大和最小弯曲载荷的能力相对较高，03SL-M7 和 03SL-M6 相较于多数群体而言其参数值均处于中等水平。03SL-M7 更趋向于原史安达曼岛人女性、石器时代晚期南非人以及当代职业游泳运动员；03SL-M6 则更趋向于石器时代晚期南非人女性和原史安达曼岛人女性群体；03SL-M5 则与当代职业长跑运动员和石器时代晚期南非人男性的分布趋势最为接近。

从不同人群相对胫骨硬度的比较结果看出，鲤鱼墩群体总体上与剑桥大学当代职业长跑运动员和原史安达曼岛人最为接近。03SL-M6 与长跑运动员的均值相近，而 03SL-M3 介于原史安达曼岛人和职业游泳运动员之间。很有意思的是，03SL-M7 具有最高的相对胫骨硬度，明显超过了大部分群体的上限，但低于石器时代晚期南非人的。结合其下肢骨无论在抗压、抗扭转力还是抗弯曲力方面都处于中等偏下水平的结果，可以推测其下肢相对上肢而言活动强度更大。

这里还需要指出，03SL-M7 在下肢骨的相关生物力学参数上与当代职业游泳运动员和石器时代晚期南非人的接近（图 7E,F），这种结果与相对胫骨硬度的比较结果（图 8）差异较大。通过上述综合比较可以看出，相对胫骨硬度只反映了个体自身上下肢活动强度的差异。虽然当代职业游泳运动员表现出较低的相对胫骨硬度，但实际上，该类型运动员也从事较为持续性的跑步锻炼以保持身体竞技状态，因此实际上其上下肢的活动强度都是相对较高的，这可以从图 7 和图 9 中得到充分的反映。所以，03SL-M7 所表现出来的看似较高的相对胫骨强度与其实际中等水平的骨骼力学强度的矛盾性就可以理解了。从这一点上来说，相对胫骨强度更有助于分析个体自身上下肢活动强度的差异性和相对性，而骨骼力学参数则更适合了解个体间实际的活动强度差异。

在智人群体的肱骨和胫骨中部极惯性矩分布的比较中，鲤鱼墩人群的三个个体中，03SL-M3 与当代职业游泳运动员的分布趋势较为一致，03SL-M6 与原史安达曼岛人的分布趋势一致，而 03SL-M7 介于石器时代晚期南非人和原史安达曼岛人之间，但更接近原史安达曼岛人。石器时代晚期南非人的胫骨硬度较肱骨硬度相对较高，而原史安达曼岛人的胫骨硬度相对弱些。以往研究表明，全新世渔猎—采集人群的行为模式与剑桥大学当代职业长跑运动员和游泳运动员存在较多的共性，特别是兼具经常性游泳和使用船只的安达曼岛人的活动模式与现代游泳运动员相当^[46]，但从图 9 的结果来看，二者的分布仍有明显的差异。

石器时代晚期南非人样本年代约为距今 11,000~2,000 年，考古学研究认为他们常居于岩性地区，地形陡峭，因此具有较高的陆地活动行为，属于高强度活动人群^[47]。他们的食物来源分布广泛，虽然频繁获取近岸海洋食物资源，但仍以陆地性食物为基础。原史安达曼岛人样本均为早于 1858 年埋葬的个体^[47]。民族学调查表明，该群体经常获取鱼类、儒艮和海龟等海洋性食物资源，也获取水果、芋头、野猪和蜂蜜等有限的陆地性食物资源。他们还经常性游泳，孩童在刚能行走时即开始学游泳。剑桥大学当代职业运动员都是在儿童时代后期或青少年时代早期开始相关游戏和训练的，大概在 10 岁左右开始参赛^[46]。研究表明，石器时代晚期南非人和原史安达曼岛人这两个人群中，男性之间在活动强度上无

显著性差异，但石器时代晚期南非人女性较原史安达曼岛人女性有着更大的活动性^[47]。不同人群两性间的差异可能因环境资源的不同而有所不同，但频繁获取近海食物资源的石器时代南非人和长居于海边的原史安达曼岛人的确存在着诸多相似的活动模式，两个群体在骨骼生物力学参数上的分布也最为相近。

综合以上的对比和分析，可以发现鲤鱼墩遗址的这些个体在活动方式上既存在较多的共性，但同时也具有各自的特点。具体而言，03SL-M7 和 03SL-M6 与安达曼岛人和石器时代晚期南非人较为接近；03SL-M5 与石器时代晚期南非人男性和当代长跑运动员较为接近；03SL-M3 则与原史安达曼岛人和当代职业游泳运动员群体较为接近。但考虑到相对胫骨硬度更适于对个体自身上下肢活动强度比较，因此实际上 03SL-M3 可能更接近原史安达曼岛人而非当代职业游泳运动员群体。

鲤鱼墩遗址多数个体所表现出来的这些活动特点可能说明他们与上述这些群体具有相同或相似的活动模式。正如前所述，末次冰期以来全球的环境和动植物面貌发生的根本性改变迫使古人不得不寻求新的食物来源。一部分开始从事种植和驯养业，另一部分则将注意力转向水域。华南沿海地区史前时期的高海平面期产生了独特的华南沿海地区新石器贝丘文化。这种独特的贝丘文化主要是以采集、渔猎为主^[26]，可能也兼营原始农业，如种植薯、芋等块茎类作物等^[11]。再结合已有的饮食结构研究和健康状况分析^[29-32]，可以设想鲤鱼墩遗址史前居民更可能是营陆上狩猎—采集以及海洋渔猎双重生业方式。因此，本文的这一推论支持目前考古学有关鲤鱼墩遗址社会经济的论述，即该遗址史前社会经济是以捕捞采集为主，辅以狩猎的综合经济的^[2]。

由于缺乏中国史前农业人群的对比数据，故不能考察鲤鱼墩遗址史前人类与其之差异。但有研究表明，北美地区男性狩猎—采集者的骨骼强度要比农民的骨骼强度高^[65]，欧洲地区人群自旧石器晚期以来在骨骼强度上也持续下降^[40,66-68]，但也有研究表明这种骨骼强度的减弱并非直线性的而是镶嵌式的^[69]。有关尼罗河谷地的研究表明，随着农业的产生，该地区狩猎—采集人群与农耕人群人群在骨骼强度上都呈现减弱的趋势^[70]。这似乎表明，对于从事农业生产的人们来说，他们的活动区域变得更加固定，其定居程度更高，这导致了下肢骨骼负担的减轻。北美有关适居沙漠地区的女性狩猎—采集者骨骼生物力学的分析表明，相比同样适居沙漠地区的普韦布洛印第安女性农耕者，这些女性的肱骨发育较弱，表明其较低的骨骼生物力学载荷。相对后者而言，这些女性的生存压力也相对较小^[71]。这些研究可以支持狩猎—采集人群与农业人群在骨骼力学特征上存在显著差异的假设。因此，可以设想若增加农业人群的对比数据，其相关骨骼生物力学参数的分布趋势可能也会在很大程度上与本文所使用的对比人群参数有所差异。

5 结 论

目前的信息尚无法确知鲤鱼墩遗址史前人类是否已经开始从事农业生产或者正处于由渔猎—采集型向农业型经济转变的时期，但通过对遗址史前人类长骨中部总横截面形态、骨骼生物力学载荷的个体差异、左右侧对称性及其生业方式的探讨，本文发现该人群的活动方式更趋向渔猎—采集人群。这一发现支持目前考古学研究所提出的其社会经济是以捕

捞采集为主，辅以狩猎的综合经济的假设。然而，我们仍不清楚那些由渔猎—采集型生业方式向农业型生业方式转变时期的人群或者史前农业初始阶段的农耕者，他们的骨骼生物力学特征是怎样的。或许兼具了典型渔猎—采集人群和典型农耕人群骨骼的特征，因而呈现一种所谓的“镶嵌式”现象，不得而知。笔者希望将来在积累充分的对比数据的基础上，对上述论题进行更全面和深入的探讨。

本文的不足之处也是显见的，即缺乏与东亚地区和东南亚地区农业社会人群的比对。据笔者所知，目前已经有学者完成了关于中国北方史前时期至青铜时代人群的骨骼生物力学的研究工作，期待在其研究结果发表之后，或许可以进行比较研究。因此，上述结论是暂时性的，只能作为将来进一步分析的参考。

附记：谨以此文纪念英年早逝的冯孟钦先生！在本文的写作过程中，得到了英国剑桥大学考古与人类学系 Jay Stock 博士、Colin Shaw 博士和阿伯丁大学考古学系 Keith Dobney 教授的诸多指教。剑桥大学考古与人类学系 Mauricio Hernandez 博士、萧婉思博士、Samantha Cox 博士、阿伯丁大学考古学系 Gordon Noble 博士以及广东省湛江市遂溪县博物馆陈成先生也给予了真诚的帮助。骨骼的 CT 扫描工作是在中山大学第一附属医院李立君主治医师、谢超凡主治医师、中山大学社会学与人类学学院申建勋先生以及瑞士日内瓦大学遗传与进化系邸达博士的积极协助下完成的。两位匿名审稿人给予了非常有益的意见和建议，使得本文的研究能够得到实质性的提升。在此谨致谢忱！

参考文献

- [1] 冯孟钦. 遂溪县鲤鱼墩新石器时代贝丘遗址 [A]. 中国考古学会. 中国考古学年鉴 (2003)[C]. 北京: 文物出版社, 2004, 264-265
- [2] 广东省文物考古研究所, 湛江市博物馆, 遂溪县博物馆. 广东遂溪鲤鱼墩新石器时代贝丘遗址发掘简报 [J]. 文物, 2015, (7): 4-18
- [3] 李法军, 王明辉, 冯孟钦, 等. 鲤鱼墩新石器时代居民头骨的形态学分析 [J]. 人类学学报, 2013, 32(3): 302-318
- [4] 安志敏. 华南早期石器试析 [A]. 中国社会科学院考古研究所. 华南及东南亚地区史前考古——纪念甑皮岩遗址发掘 30 周年国际学术研讨会论文集 [C]. 北京: 文物出版社, 2003, 23-30
- [5] 严文明. 长沙马王堆汉墓与华南地区史前考古 [A]. 中国社会科学院考古研究所. 华南及东南亚地区史前考古——纪念甑皮岩遗址发掘 30 周年国际学术研讨会论文集 [C]. 北京: 文物出版社, 2003, 33-36
- [6] 何传坤 [美] 著, 鲍卫东 译. 台湾史前的埋葬模式 (前篇) [J]. 东南文化, 1992, (1): 93-112
- [7] 何传坤 [美] 著, 鲍卫东 译. 台湾史前的埋葬模式 (后篇) [J]. 东南文化, 1992, (6): 76-95
- [8] 袁靖. 论中国新石器时代居民获取肉食资源的方式 [J]. 考古学报, 1999, (1): 1-22
- [9] 王明辉. 体质特征 [A]. 中国社会科学院考古研究所, 广西在族自治区文物工作队, 桂林市文物工作队, 等. 桂林甑皮岩 [R]. 北京: 文物出版社, 2003, 491-499
- [10] 冯孟钦. 屈肢葬——一种可能由南往北传播的葬俗 [A]. 岭南考古研究中心. 岭南考古研究 (5)[C]. 香港: 香港考古学会, 2006, 111-117
- [11] 赵志军. 对华南地区原始农业的再认识 [A]. 中国社会科学院考古研究所. 华南及东南亚地区史前考古——纪念甑皮岩遗址发掘 30 周年国际学术研讨会论文集 [C]. 北京: 文物出版社, 2006, 145-156
- [12] 广东省博物馆. 广东南海县灶岗贝丘遗址发掘简报 [J]. 考古, 1984, (3): 203-212
- [13] 中国社会科学院考古研究所广西工作队, 广西壮族自治区文物考古队, 南宁市博物馆. 广西邕宁县顶蛳山遗址的发掘 [J]. 考古, 1998, (11): 11-33
- [14] 蒋廷瑜. 广西考古四十年概述 [J]. 考古, 1998, (11): 1-10
- [15] 中国社会科学院考古研究所, 广西壮族自治区文物考古队, 桂林市文物工作队, 等. 桂林甑皮岩 [M]. 北京: 文物出版社, 2003, 14-40
- [16] 中国社会科学院考古研究所 编. 华南及东南亚地区史前考古: 纪念甑皮岩遗址发掘 30 周年国际学术研讨会论文集 [C]. 北京: 文物出版社, 2006, 1-36

- [17] 卜工. 文明起源的中国模式 [M]. 北京: 科学出版社, 2007, 207-242
- [18] Pietruszewsky M and Douglas MT. Ban Chiang: a prehistoric site in Northeast Thailand I: the human skeletal remains[M]. Philadelphia: University of Pennsylvania Museum of Archaeology and Anthropology, 2002, 219-259
- [19] Li FJ, Wang MH, Fu XG, et al. Discovery of the earliest deliberately dismembered burials in the world: the Ding Si Shan Site in Guangxi, Southern China[J]. *Antiquity*, 87(337). Available at: <http://antiquity.ac.uk/projgall/fu337/>, 2013
- [20] 李平日, 方国祥, 黄光庆. 珠江三角洲全新世气候变化 [A]. 施雅风, 孔昭宸. 中国全新世大暖期气候与环境 [C]. 北京: 海洋出版社, 1992, 100-110
- [21] 王颖. 中国海洋地理 [M]. 北京: 科学出版社, 2013, 626-676
- [22] 廖国一. 环北部湾地区史前文化的考古发现和研究 [A]. 中国社会科学院考古研究所. 华南及东南亚地区史前考古——纪念甑皮岩遗址发掘 30 周年国际学术研讨会论文集 [C]. 北京: 文物出版社, 2006, 387-395
- [23] 方国祥, 李平日, 黄光庆. 粤桂沿海全新世海平面变化 [A]. 施雅风, 孔昭宸. 中国全新世大暖期气候与环境 [C]. 北京: 海洋出版社, 1992 年, 131-137
- [24] 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期气候与环境的基本特征 [A]. 施雅风, 孔昭宸. 中国全新世大暖期气候与环境 [C]. 北京: 海洋出版社, 1992, 1-28
- [25] 姚衍桃, Harff J, Meyer M, 等. 南海西北部末次盛冰期以来的古海岸线重建 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2009, 39(6): 753-762
- [26] 吕鹏. 广西邕江流域贝丘遗址的动物考古学研究 [D]. 北京: 中国社会科学院研究生院博士学位论文, 2010, 329-382
- [27] 郑卓, 邓韫, 张华. 华南沿海热带-亚热带地区全新世环境变化与人类活动的关系 [J]. 第四纪研究, 2004, 24(4): 387-393
- [28] 李法军, 冯孟钦. 鲤鱼墩新石器时代贝丘遗址出土人骨的研究意义 [A]. 中山大学人类学系, 中国社会科学院边疆考古研究中心. 边疆民族考古与民族考古学集刊 [C]. 北京: 文物出版社, 2010, 82-91
- [29] 赵志军, 吕烈丹, 傅宪国. 广西邕宁县顶狮山遗址出土植硅石的分析与研究 [J]. 考古, 2005, (11): 76-86
- [30] 陈伟驹, 李法军. 鲤鱼墩遗址出土人牙的牙齿磨耗和龋齿研究 [J]. 人类学报, 2013, 32(1): 45-51
- [31] 李法军, 王明辉, 朱泓, 等. 鲤鱼墩: 一个华南新石器时代遗址的生物考古学研究 [M]. 广州: 中山大学出版社, 2013, 189-203
- [32] 胡耀武, 李法军, 王昌燧, 等. 广东湛江鲤鱼墩遗址人骨的 C_N 稳定同位素分析——华南新石器时代先民生活方式初探 [J]. 人类学学报, 2010, 29(3): 264-269
- [33] Frankel VH and Burstein AH. Orthopaedic biomechanics[M]. Lea and Febiger: Philadelphia, 1970, 1-188
- [34] Trinkaus E, Churchill SE and Ruff CB. Postcranial robusticity in *Homo*. II Humeral bilateral asymmetry and bone plasticity[J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 1994, (93): 1-34
- [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): 442-452
- [36] Nordin M, Frankel VH. Basic biomechanics of the musculoskeletal system (3rd edition)[M]. London: Lippincott Williams and Wilkins, 2001, 27-55
- [37] Ruff CB. Sexual dimorphism in human lower limb bone structure: relationship to subsistence strategy and sexual division of labor[J]. *Journal Human Evolution*, 1987, (16): 391-416
- [38] Stock JT. Hunter-gatherer postcranial robusticity relative to patterns of mobility, climatic adaptation, and selection for tissue economy[J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 2006, (131): 194-204
- [39] Shaw CN, Stock JT. Intensity, repetitiveness, and directionality of habitual adolescent mobility patterns influence the tibial diaphysis morphology in athletes[J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 2009, (140): 149-159
- [40] Macintosh AA, Pinhasi R, Stock JT. Divergence in male and female manipulative behaviors with the intensification of metallurgy in central Europe[J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(11): e112116. doi:10.1371/journal.pone.0112116
- [41] Stock JT, Shaw CN. Which measures of diaphyseal robusticity are robust? A comparison of external methods of quantifying the strength of long bone diaphyses to cross-sectional geometric properties[J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 2007, (134): 412-423
- [42] Doube M, Kłosowski MM, Arganda-Carreras I, et al. BoneJ: free and extensible bone image analysis in ImageJ[J]. *Bone* 2010, (47): 1076-9. doi: 10.1016/j.bone.2010.08.023
- [43] Ruff CB. Biomechanical analyses of archaeological human skeletons[A]. Katzenberg MA, Saunders SR. *Biological anthropology of the human skeleton*[C]. New York: Wiley Liss, 2008, 183-206
- [44] 何嘉宁, 房迎三, 何汉生, 等. “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
- [45] Ruff CB, Trinkaus E, Walker A, et al. Postcranial robusticity in *Homo*. I. Temporal trends and mechanical interpretation[J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 1993, (91): 21-53
- [46] Shaw CN, Stock JT. Extreme mobility in the late Pleistocene? Comparing limb biomechanics among fossil *Homo*, varsity athletes

- and Holocene foragers[J]. *Journal of Human Evolution*, 2013, 64(4): 242-249
- [47] Stock JT, Pfeiffer S. Linking structural variability in long bone diaphyses to habitual behaviors: foragers from the southern African Later Stone Age and the Andaman Islands[J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 2001, (115): 337-348
- [48] Davies TG, Shaw CN, Stock JT. A test of a new method and software for the rapid estimation of cross-sectional geometric properties of long bone diaphyses from 3D laser surface scans[J]. *Archaeological and Anthropological Science*, 2012, (4): 277-290
- [49] Auerbach BM, Ruff CB. Human body mass estimation: a comparison of “morphometric” and “mechanical” methods[J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 2004, (125): 331-342
- [50] McHenry HM. Body size and proportions in early Hominids[J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 1992, (87): 407-431.
- [51] Grine FE, Jungers WL, Tobias PV, et al. Fossil *Homo* femur from Berg Aukas, northern Namibia[J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 1995, (26): 67-78
- [52] Ruff CB, Scott WW, Liu AYC. Articular and diaphyseal remodeling of the proximal femur with changes in body mass in adults[J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 1991, (86): 397-413
- [53] Nikita E, Siew YY, Stock JT, et al. Activity patterns in the Sahara Desert: an interpretation based on cross-sectional geometric properties[J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 2011, 146: 423-434
- [54] Mays SA. Asymmetry in metacarpal cortical bone in a collection of British Post-Mediaeval human skeletons[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2002, (29): 435-441
- [55] Auerbach BM, Ruff CB. Limb bone bilateral asymmetry: variability and commonality among modern humans[J]. *Journal of Human Evolution*, 2006, (50): 203-218
- [56] Chevalier T. La diaphyse fémorale AL 333-61: preuve d'une bipédie comme unique mode locomoteur il y a 3,2 Ma en Ethiopie?[J]. *Les Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 2013, (25): 169-189
- [57] Wescott DJ. Effect of mobility on femur midshaft external shape and robusticity[J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 2006, (130): 201-213
- [58] Charles HCK. The influence of function as exemplified in the morphology of the lower extremity of the Punjabi[J]. *Journal of Anatomy and Physiology*, vol. XXXVIII, 1893, 1 and 271
- [59] Wood WQ. The tibia of the Australian aborigine. *Journal of Anatomy*, 1920, Jan, 54(Pt 2-3): 232-257
- [60] 魏偏偏, 邢松. 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 [J]. 人类学学报, 2013, 32(3): 354-364
- [61] Fatah EEA, Shirley NR, Mahfouz MR, et al. A three-dimensional analysis of bilateral directional asymmetry in the human clavicle[J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 2012, (149): 547-559
- [62] Churchill SE, Formicola V. A case of marked bilateral asymmetry in the upper limbs of an Upper Palaeolithic male from Barmasse Grande (Liguria, Italy)[J]. *International Journal of Osteoarchaeology*, 1997, (7): 18-38
- [63] Lazenby RA. Skeletal biology functional asymmetry and origins of handedness[J]. *Journal of theoretical Biology*, 2002, (218): 129-138
- [64] Lazenby RA, Cooper DML, Angus S, et al. Articular constraint, handedness, and directional asymmetry in the human second metacarpal[J]. *Journal of Human Evolution*, 2008, (54): 875-885
- [65] Ruff CB. Skeletal structure and behavioral patterns of prehistoric Great Basin populations[A]. Hemphill BE, Larsen CS. Understanding prehistoric lifeways in the Great Basin Wetlands: Bioarchaeological reconstruction and interpretation[C]. Salt Lake City: University of Utah Press, 1999, 290-320
- [66] Ruff CB. Reconstructing behavior in Spanish Florida: the biomechanical evidence[A]. Larsen CS. *Bioarchaeology of Spanish Florida: the impact of colonialism*[C]. Gainesville: University Press of Florida, 2001, 113-145
- [67] Marchi D, Sparacello VS, Holt BM, et al. Biomechanical approach to the reconstruction of activity patterns in Neolithic Western Liguria, Italy[J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 2006, (131): 447-455
- [68] Ruff CB, Holt B, Niskanen M, et al. Gradual decline in mobility with the adoption of food production in Europe supporting information[J]. *PNAS*, 2015, 112(23): 7147-7152
- [69] Sládek V, Berner M, Sailer R. Mobility in central European late Neolithic and early Bronze Age: femoral cross-sectional geometry[J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 2006, (130): 320-332
- [70] Stock JT, O'Neill MC, Ruff CB, et al. Body size, skeletal biomechanics, mobility and habitual activity from the Late Palaeolithic to the Mid-Dynastic Nile Valley[A]. Pinhasi R, Stock JT. *Human Bioarchaeology of the transition to agriculture*[C]. Oxford: John Wiley & Sons, Ltd., 2011, 347-370
- [71] Ogilvie MD, Hilton CE. Cross-sectional geometry in the humeri of foragers and farmers from the Prehispanic American Southwest: exploring patterns in the sexual division of labor[J]. *American Journal of Physical Anthropology*, 2011, (144): 11-21