

## Micro-CT 分析跟骨内骨小梁分布及结构特征

张凤珍<sup>1</sup>, 孙瑞芬<sup>2</sup>, 李梓瑜<sup>1</sup>, 王星<sup>3</sup>, 李琨<sup>1</sup>, 李志军<sup>1</sup>, 张少杰<sup>1</sup><https://doi.org/10.12307/2024.617>

投稿日期: 2023-06-21

采用日期: 2023-08-07

修回日期: 2023-09-18

在线日期: 2023-09-26

中图分类号:

R445; R323; R681.8

文章编号:

2095-4344(2024)24-03885-05

文献标识码: B

## 文章快速阅读: Micro-CT 扫描观测跟骨内部骨小梁的走行、分布和微观结构参数

使用 Micro-CT 连续扫描干燥成人跟骨标本。

获得 DICOM 格式的显微 CT 图像。

导入影像资料到 Hiscan Analyzer 软件, 显示跟骨矢状面、冠状面、水平面图像。

逐层观察显微 CT 图像, 依据骨小梁的分布和走行, 将跟骨矢状面分为 6 个部分, 每个部分均选择 1 个等体积的兴趣区域。

## 结论:

中和三角区主要分布杆状骨小梁, 该部位骨质较疏松, 受到高冲击力时抗压能力差, 是易发生骨折的部位。

三维重建跟骨及骨小梁, 观察立体微观结构。二值化后, 分别测量感兴趣区域的骨小梁参数, 并进行统计分析。

## 文题释义:

Micro-CT: 为微计算机断层扫描(Micro Computed Tomography)的简写, 是在1-100  $\mu\text{m}$ 分辨率上显示骨骼的X射线成像方法, 可对骨的内部微观结构进行精准测量。

骨小梁: 位于骨的骨松质内, 走行、密度、厚度、间隙及数量等微观结构复杂, 其微观结构与骨骼的功能相适应。

## 摘要

背景: 跟骨位于足的后下部, 受力较大。跟骨外形复杂且不规则, 外周有较薄的皮质骨包绕, 内部充满大量的骨小梁, 探讨骨小梁的微观结构、走行及分布特征有助于提高对跟骨骨折的认识。

目的: 采用微计算机断层扫描仪(Micro-CT)扫描跟骨标本获得其影像资料, 对其内部骨小梁结构进行分析, 探讨跟骨内骨小梁的形态、分布及结构特征。

方法: 采用 Micro-CT 连续扫描干燥成人跟骨标本, 扫描后获得影像图像, 将其以 DICOM 格式存储。导入影像资料到 Hiscan Analyzer 软件, 显示清晰完整的成人跟骨矢状面、冠状面、水平面的图像, 逐层观察骨小梁的走行, 依据骨小梁走行特点将跟骨矢状面分为 6 个部分, 在以 7 mm 为标准的相同厚度下, 每个部分选择 1 个 49 mm<sup>2</sup> 等面积的兴趣区, 三维重建后获得跟骨及骨小梁的立体微观结构, 二值化后运用软件计算感兴趣区域内骨小梁的体积分数、表面密度、骨小梁厚度、骨小梁间隙和骨小梁数量参数。

结果与结论: ①跟骨表面皮质层很薄, 内部充满大量骨松质, 在 Gissane 角的骨皮质明显增厚; ②跟骨上部的骨小梁体积分数大于跟骨下部前端、中和三角区、跟骨下后部、跟骨结节部、跟骨底部, 跟骨结节部的骨小梁体积分数大于跟骨下部前端、中和三角区、跟骨下后部、跟骨底部; 跟骨结节部的骨小梁表面密度大于跟骨下部前端、中和三角区、跟骨底部, 跟骨上部、跟骨下后部的骨小梁表面密度大于中和三角区; 跟骨上部的骨小梁厚度大于跟骨结节部; 中和三角区的骨小梁间隙大于跟骨上部、跟骨结节部; 跟骨结节部的骨小梁数量大于中和三角区; ③中和三角区主要分布杆状骨小梁, 骨小梁表面密度最小、体积分数较小、骨小梁间隙最大; 该部位骨质较疏松, 受到高冲击力时抗压能力差, 骨小梁最先发生断裂, 是易发生骨折的部位。

关键词: MicroCT; 跟骨; 骨小梁; 形态特征; 骨折

## Micro-CT analysis of distribution and structural characteristics of bone trabeculae in the calcaneus

Zhang Fengzhen<sup>1</sup>, Sun Ruifen<sup>2</sup>, Li Ziyu<sup>1</sup>, Wang Xing<sup>3</sup>, Li Kun<sup>1</sup>, Li Zhijun<sup>1</sup>, Zhang Shaojie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Basic Medicine, <sup>2</sup>Digital Medicine Center, Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010110, Inner Mongolia Autonomous Region, China; <sup>2</sup>Second Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010110, Inner Mongolia Autonomous Region, China

Zhang Fengzhen, Master candidate, Attending physician, Lecturer, School of Basic Medicine, Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010110, Inner Mongolia Autonomous Region, China

Corresponding author: Zhang Shaojie, MD, Professor, School of Basic Medicine, Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010110, Inner Mongolia Autonomous Region, China

内蒙古医科大学, <sup>1</sup>基础医学院, <sup>3</sup>数字医学中心, 内蒙古自治区呼和浩特市 010110; <sup>2</sup>内蒙古医科大学第二附属医院, 内蒙古自治区呼和浩特市 010110

第一作者: 张凤珍, 1988 年生, 内蒙古自治区兴和县人, 汉族, 内蒙古医科大学在读硕士, 主治医师, 讲师, 主要从事解剖和放射医学方面的研究。

通讯作者: 张少杰, 医学博士, 教授, 内蒙古医科大学基础医学院, 内蒙古自治区呼和浩特市 010110

<https://orcid.org/0009-0001-6528-4142> (张凤珍)

基金资助: 内蒙古自治区教育厅科技领军人才和创新团队建设项目 (NMGIRT2307), 项目负责人: 张少杰; 内蒙古医科大学校级重点项目

(YKD2022D007), 项目负责人: 张少杰; 内蒙古自治区蒙医药协调创新中心科研项目 (MYXYTB202101), 项目负责人: 张少杰; 内蒙古自治区卫生健康科技计划项目 (202201219), 项目负责人: 张少杰; 内蒙古医科大学青年领创团队项目 (QNLC-2020025), 项目负责人: 张少杰; 国家自然科学基金

基金 (81660358), 项目负责人: 张少杰; 内蒙古自治区自然科学基金资助项目 (2019MS08017), 项目负责人: 张少杰; 国家自然科学基金 (81860382), 项目负责人: 王星; 国家自然科学基金 (81860383), 项目负责人: 李志军; 内蒙古自治区自然科学基金

资助项目 (2020MS03061), 项目负责人: 王星; 内蒙古自治区自然科学基金资助项目 (2020LH08021), 项目负责人: 李志军

引用本文: 张凤珍, 孙瑞芬, 李梓瑜, 王星, 李琨, 李志军, 张少杰. Micro-CT 分析跟骨内骨小梁分布及结构特征 [J]. 中国组织

工程研究, 2024, 28(24):3885-3889.



## Abstract

**BACKGROUND:** The calcaneus is located in the lower posterior part of the foot and is heavily stressed. Calcaneus is complex and irregular in shape, surrounded by thin cortical bone and filled with a large number of trabeculae. The study of the microstructure, movement, and distribution of trabeculae is helpful to improve the understanding of calcaneus fracture.

**OBJECTIVE:** The image data of calcaneus were obtained by scanning the calcaneus specimens with micro-computed tomography, and the structure of trabecular bone in calcaneus was analyzed to explore the morphology, distribution and structural characteristics of trabecular bone in calcaneus.

**METHODS:** Dry adult calcaneus specimens were continuously scanned by micro-computed tomography, and the images were obtained after scanning and stored in DICOM format. Image data were imported into Hiscan Analyzer software to display clear and complete images of the sagittal plane, coronal plane, and the horizontal plane of the adult calcaneus. The trabecular movement of bone was observed layer by layer. According to the trabecular movement characteristics, the sagittal plane of the calcaneus was divided into six parts. A 49-mm<sup>2</sup> region of interest was selected for each part at the same thickness as 7 mm. The three-dimensional microstructure of calcaneus and trabecular bone was obtained after three-dimensional reconstruction. After binarization, the volume fraction, surface density, trabecular thickness, trabecular space, and trabecular number parameters of the trabecular bone in the region of interest were calculated by software.

**RESULTS AND CONCLUSION:** (1) The cortical layer of the calcaneus was very thin and filled with a large amount of cancellous bone, and the cortical layer of the horn of Gissane was obviously thickened. (2) The trabecular volume fraction in the upper part of the calcaneus was greater than that in the anterior part of the lower part of the calcaneus, the central triangle, the posterior part of the lower part of the calcaneus, and the base of the calcaneus, and the trabecular volume fraction in the tubercle of the calcaneus was greater than that in the anterior part of the lower part of the calcaneus, the central triangle, the posterior part of the lower part of the calcaneus, and the base of the calcaneus. The surface density of the trabecular bone in the tubercle of the calcaneus was higher than that in the front of the lower calcaneus, the middle triangle area, and the bottom of calcaneus, and the surface density of the trabecular bone in the upper part of the calcaneus was greater than that in the tubercle of the calcaneal bone. The thickness of the trabecular bone in the upper part of the calcaneus was greater than that in the tubercle of the calcaneal bone. The bone trabecular space in the middle triangle was larger than that in the upper part of the calcaneus and calcaneal tubercles. The number of bone trabeculae in the calcaneal tubercles was greater than that in the middle triangle area. (3) These results indicate that the trabeculae of rod bone were mainly distributed in the middle triangle area. The surface density of trabeculae was the smallest, the volume fraction was smaller, and the space between trabeculae was the largest. This part of the bone is relatively loose. The compression resistance is poor when subjected to high impact. The trabecular bone fractures first occur, which is a prone site for fractures.

**Key words:** Micro-CT; calcaneus; bone trabeculae; morphological characteristics; fracture

**Funding:** Science and Technology Leading Talent and Innovation Team Construction Project of Inner Mongolia Autonomous Region Department of Education, No. NMGIRT2307 (to ZSJ); Key Campus Project of Inner Mongolia Medical University, No. YKD2022D007 (to ZSJ); Research Project of Inner Mongolia Autonomous Region Mongolian Medicine Coordination and Innovation Center, No. MYYXTYB202101 (to ZSJ); Health Science and Technology Plan Project of Inner Mongolia Autonomous Region, No. 202201219 (to ZSJ); Youth Innovation Team Project of Inner Mongolia Medical University, No. QNLC-2020025 (to ZSJ); National Natural Science Foundation of China, No. 81660358 (to ZSJ); National Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region, No. 2019MS08017 (to ZSJ); National Natural Science Foundation of China, No. 81860382 (to WX); National Natural Science Foundation of China, No. 81860383 (to LZJ); National Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region, No. 2020MS03061 (to WX); National Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region, No. 2020LH08021 (to LZJ)

**How to cite this article:** ZHANG FZ, SUN RF, LI ZY, WANG X, LI K, LI ZJ, ZHANG SJ. Micro-CT analysis of distribution and structural characteristics of bone trabeculae in the calcaneus. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2024;28(24):3885-3889.

## 0 引言 Introduction

跟骨位于足的后下部,是最大的跗骨,其外形复杂且不规则,内部充满大量的松质骨,骨松质由骨小梁构成,外周有骨皮质包绕<sup>[1-2]</sup>。骨小梁常见板层状、杆状2种形态,分布、走行、厚度、间隙及数量等微观结构复杂,其微观结构与骨骼的功能相适应<sup>[3-4]</sup>。跟骨骨折约占全身骨折的2%,占跗骨骨折的60%,评估骨小梁形态及结构特征有助于提高对骨折高风险人群的识别<sup>[5]</sup>。

目前,观测骨小梁微观结构有破坏性检测和非破坏性检测两类方法,破坏性检测方法是通过对组织学切片结合专业软件计算出骨结构参数<sup>[6]</sup>;非破坏性检测方法是运用高分辨率、高精度的检查设备,如高分辨率CT、MRI、显微CT(Micro Computed Tomography, Micro-CT)等观测骨小梁的微观结构<sup>[7-9]</sup>。Micro-CT分辨率达1-100 μm,利用X射线方法显示骨骼的微观结构,具有超高分辨率、无创及高效的特点<sup>[10]</sup>。骨小梁呈多孔网状结构,典型尺寸100-400 μm、小梁间隙200-2 000 μm<sup>[11]</sup>,Micro-CT可以精准地观测骨小梁微观结构。

近年来,应用Micro-CT扫描方法对腰椎、髋关节、膝关节的骨小梁研究较多,包括骨密度、骨小梁微观结构、骨小梁重建及力学分析等<sup>[12-15]</sup>,但对跟骨骨小梁微观结构的分析较少。此次研究分析跟骨内骨小梁的分布及结构特征,测量不同部位的骨小梁参数,探讨跟骨骨小梁结构与骨折发生的潜在关系。

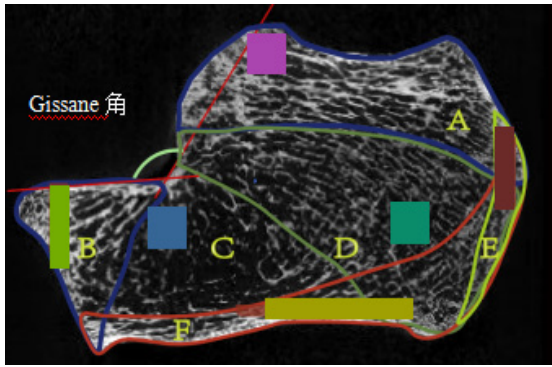
## 1 材料和方法 Materials and methods

1.1 设计 影像学测量实验。

1.2 时间及地点 实验于2022年8月在内蒙古医科大学的内蒙古自治区数字转化医学工程技术中心完成。

1.3 材料 由内蒙古医科大学人体解剖学实验室提供干燥成人跟骨标本27例,右侧7例,左侧20例,检查标本无骨破坏和缺损,供者家属对实验知情同意。研究方案的实施符合内蒙古医科大学的相关伦理要求(医院伦理批件号:YKD2016063,审批时间:2016-03-07)。声明确认获得了发布识别信息/图像的知情同意;声明确认所有方法均按照相关准则和法规执行。

1.4 实验方法 采用Micro-CT机(苏州海斯菲德信息科技有限公司, Hiscan XM Micro-CT)连续扫描干燥成人跟骨标本, Micro-CT扫描仪配置参数:扫描电压60 kV,扫描电流134 μA,单次曝光时间50 ms,扫描分辨率70 μm,扫描角度间隔0.5°。扫描后获得跟骨的显微CT图像并以DICOM格式存储。将影像资料导入到Hiscan Analyzer软件(V3.0苏州海斯菲德信息科技有限公司),显示清晰完整的成人跟骨矢状面、冠状面、水平面的CT图像,逐层观察骨小梁的走行,依据骨小梁走行特点将跟骨矢状面分为6个部分,在以7 mm为标准的相同厚度下,每个部分选择1个49 mm<sup>2</sup>等面积的感兴趣区,见图1。三维重建后观察跟骨及骨小梁的立体微观结构,见图2, 3,二值化后运用软件计算感兴趣区域内的骨小梁参数。



图注: A 区为跟骨上部, B 区为跟骨下部前端, C 区为中和三角区, D 区为跟骨下后部, E 区为跟骨结节部, F 区为跟骨底部。□: 各部分 ROI  
图 1 | 跟骨 Micro-CT 扫描矢状面图像上的分部及感兴趣区 (ROI) 标注  
Figure 1 | Segmentation and region of interest labeling on sagittal images of calcaneus Micro-CT scan

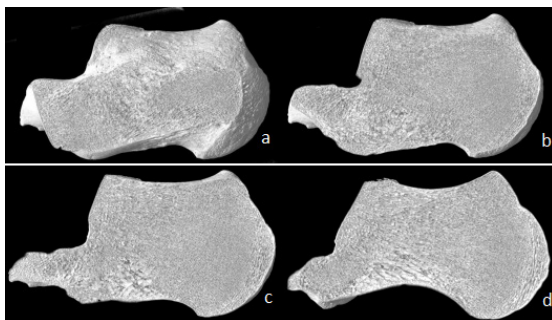


图 2 | 左侧跟骨三维重建后, 由外到内 (a→d) 不同矢状面的图像  
Figure 2 | Images of different sagittal planes from outside to inside (a→d) after three-dimensional reconstruction of the left calcaneus

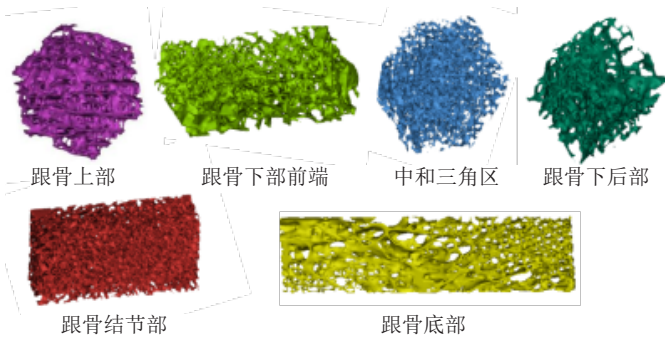


图 3 | 跟骨矢状面感兴趣区域的骨小梁三维重建图  
Figure 3 | Three-dimensional reconstruction of bone trabeculae in the region of interest on the sagittal plane of the calcaneus

1.5 主要观察指标 观察跟骨骨小梁的走行和分布, 测量感兴趣区域骨小梁参数: ①骨体积分数 (bone volume /total volume, BV/TV), 表示骨小梁体积与感兴趣区域间体积的比值; ②骨表面密度 (bone surface density, BS/TV), 表示感兴趣区域中骨表面积与总体积的比值; ③骨小梁厚度, 指运用 3D 方法直接测得的骨小梁平均厚度; ④骨小梁间隙, 指运用 3D 方法直接测得的骨小梁间平均距离; ⑤骨小梁数量, 是指单位长度中骨小梁的平均数量。

1.6 统计学分析 所得数据运用 SPSS 26.0 软件进行整理和统计学分析, 计量数据资料采用  $\bar{x} \pm s$  表示, 采用方差分析和非参秩和检验跟骨骨小梁微观结构的参数, 确立检验水准为

$\alpha=0.05$ ,  $P < 0.05$  为差异有显著性意义。此文的统计学方案得到内蒙古医科大学基础医学院统计学专家审核。

## 2 结果 Results

2.1 跟骨骨小梁形态及分布特征 在跟骨 Micro-CT 扫描影像图像上可以观察到, 跟骨表面皮质层很薄, 内部充满大量骨松质, 在 Gissane 角的骨皮质明显增厚。Gissane 角位于距骨外侧突的下方, 代表跟骨前后关节面之间的夹角<sup>[6]</sup>。骨外表面有滋养孔, 滋养孔从皮质骨表面向骨松质内部深入。除中和三角区以外, 在骨松质其他部分偶可见因骨小梁减少或消失形成的空洞, 在 1 例标本扫描矢状图跟骨上部观测到 1 个椭圆形、约 17.44 mm×2.86 mm 的空洞, 其周围的微结构与正常骨小梁结构对比未见明显不同。

跟骨上部 (A 区) 主要走行平行跟骨上面的骨小梁; 跟骨下部前端 (B 区), 以 Gissane 角为顶点、骹关节面为底的锥体, 其内主要走行致密的层状骨小梁; 中和三角区 (C 区) 主要走行稀疏的杆状骨小梁; 跟骨下后部 (D 区) 主要走行网状的骨小梁; 跟骨结节部 (E 区) 主要走行平行跟骨结节的骨小梁; 跟骨底部 (F 区) 主要走行平行跟骨底面的骨小梁, 与 B、D 区骨小梁交织成网状, 见图 1。

依据骨小梁的走行特点, 将跟骨矢状面分为 6 个部分: A 区, 从距下关节后面至跟骨结节上; B 区, 从距下关节向前至骹关节面; C 区, 以 Gissane 角为顶点与 B、D、F 区交界形成的三角区域; D 区, 从距下关节后面至跟骨结节; E 区, 从跟腱附着处到跟骨结节后下方; F 区, 从跟骨结节到足底。

2.2 感兴趣区域骨小梁结构参数 在跟骨矢状面, 以 7 mm 为标准的相同厚度下, 各部分选择 1 个 49 mm<sup>2</sup> 等面积的感兴趣区, 并测量其 BV/TV、BS/TV、骨小梁厚度、骨小梁间隙和骨小梁数量, 测量结果见表 1。

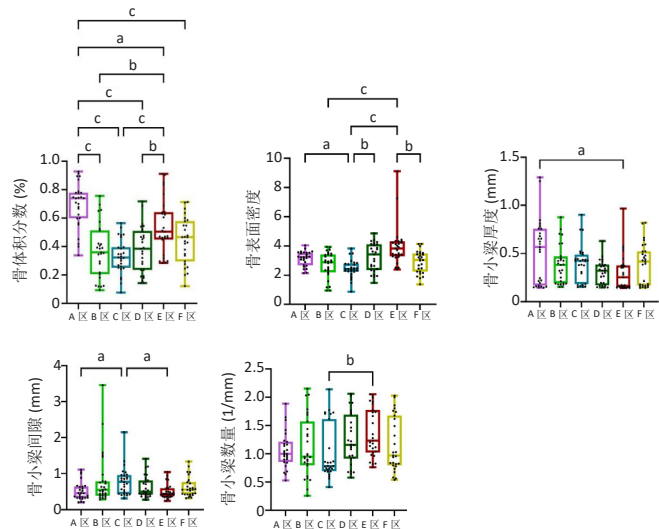
表 1 | 跟骨各部分骨小梁微观结构参数测量数据 ( $\bar{x} \pm s$ , n=27)  
Table 1 | Measurement data of trabecular microstructure parameters of calcaneus

| 跟骨分部 | 骨体积分数 (BV/TV, %)        | 骨表面密度 (BS/TV)           | 骨小梁厚度 (mm)             | 骨小梁间隙 (mm)             | 骨小梁数量 (1/mm)           |
|------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| A 区  | 0.69±0.16               | 3.15±0.50 <sup>b</sup>  | 0.52±0.34 <sup>d</sup> | 0.51±0.25 <sup>b</sup> | 1.06±0.32              |
| B 区  | 0.37±0.19 <sup>ae</sup> | 2.71±0.91 <sup>d</sup>  | 0.39±0.21              | 0.81±0.72              | 1.12±0.53              |
| C 区  | 0.33±0.12 <sup>ae</sup> | 2.45±0.62 <sup>cd</sup> | 0.40±0.19              | 0.79±0.39 <sup>d</sup> | 1.01±0.48 <sup>d</sup> |
| D 区  | 0.38±0.16 <sup>ee</sup> | 3.22±0.96               | 0.30±0.12              | 0.62±0.30              | 1.24±0.46              |
| E 区  | 0.54±0.19 <sup>a</sup>  | 3.99±1.38 <sup>e</sup>  | 0.30±0.19              | 0.50±0.20              | 1.38±0.43              |
| F 区  | 0.44±0.16 <sup>a</sup>  | 2.90±0.76               | 0.39±0.21              | 0.63±0.28              | 1.16±0.48              |

表注: A 区为跟骨上部, B 区为跟骨下部前端, C 区为中和三角区, D 区为跟骨下后部, E 区为跟骨结节部, F 区为跟骨底部。与 A 区相比, <sup>a</sup> $P < 0.05$ ; 与 C 区相比, <sup>b</sup> $P < 0.05$ ; 与 D 区相比, <sup>c</sup> $P < 0.05$ ; 与 E 区相比, <sup>d</sup> $P < 0.05$ ; 与 F 区相比, <sup>e</sup> $P < 0.05$

2.2.1 骨小梁 BV/TV 测量结果分析 A 区骨小梁的 BV/TV 值大于 B、C、D、E、F 区, E 区大于 B、C、D 区。A、E 区和 B、C、D 区比较, A 区和 E、F 区比较, 差异均有显著性意义 ( $P < 0.05$ ), 其余部位骨小梁的 BV/TV 相互比较差异均无显著性意义 ( $P > 0.05$ ), 见图 4。





图注：A 区为跟骨上部，B 区为跟骨下部前端，C 区为中和三角区，D 区为跟骨下后部，E 区为跟骨结节部，F 区为跟骨底部。• 为测量值；<sup>a</sup> $P < 0.05$ ，<sup>b</sup> $P < 0.01$ ，<sup>c</sup> $P < 0.001$

图 4 | 跟骨各部分骨小梁微观结构参数测量结果及统计学比较  
Figure 4 | Measurement results and statistical comparison of trabecular microstructure parameters of calcaneus

2.2.2 骨小梁 BS/TV 测量结果分析 E 区骨小梁的 BS/TV 值大于 B、C、F 区，A、D 区骨小梁的 BS/TV 值大于 C 区。C 区和 A、D、E 区比较，B、F 区和 E 区比较，差异均有显著性意义 ( $P < 0.05$ )，其余部位骨小梁的 BS/TV 相互比较差异均无显著性意义 ( $P > 0.05$ )，见图 4。

2.2.3 骨小梁厚度测量结果分析 A 区骨小梁厚度值大于 E 区，差异有显著性意义 ( $P < 0.05$ )，其余部位骨小梁厚度相互比较差异均无显著性意义 ( $P > 0.05$ )，见图 4。

2.2.4 骨小梁间隙测量结果分析 C 区骨小梁间隙值大于 A、E 区，差异均有显著性意义 ( $P < 0.05$ )，其余部位骨小梁间隙相互比较差异无显著性意义 ( $P < 0.05$ )，见图 4。

2.2.5 骨小梁数量测量结果分析 E 区骨小梁数量值大于 C 区，差异有显著性意义 ( $P < 0.05$ )，其余部位的骨小梁数量相互比较差异无显著性意义 ( $P < 0.05$ )，见图 4。

### 3 讨论 Discussion

人体共有 206 块骨，足骨共计 52 块，占骨骼总数的 1/4，是人体下肢中重要的组成部分，其中跟骨是体积最大的一块足骨，直接与地面接触，参与多项人类日常活动，承担直立、运动等功能，发挥维持平衡、缓冲、吸震等作用<sup>[17-18]</sup>。创伤、骨质疏松、运动等原因均可引起跟骨骨折，当骨矿成分及骨基质减少、骨质下降、骨微结构破坏、骨骼脆性增加时，骨折发生的风险上升<sup>[19-20]</sup>。骨小梁微观结构是评估骨质的重要参数之一<sup>[21]</sup>，通过分析跟骨骨小梁的分布、参数来评价骨质，可为跟骨骨折的发生提供基础数据，具有重要的现实意义。

出生时骨小梁细小、排列致密且各个方向相同，机械环境的作用下骨小梁微观结构不断变化，出生后第一年骨体积

分数显著降低、平均小梁厚度增加。运动、激素及磁场等因素对骨小梁的微观结构均会产生影响<sup>[22-26]</sup>。在 Micro-CT 图像上，可以观察到成人跟骨各部位的骨小梁不同，根据骨小梁走行将跟骨分为 6 个部分。生活中站立、运动时跟骨各部位的受力状态不同，引起骨小梁微观结构发生改变。其中 BV/TV、BS/TV、骨小梁厚度、骨小梁间隙和骨小梁数量是描述骨小梁的常见参数，此次研究发现不同部位参数存在差异。

此次研究运用 Micro-CT 机扫描跟骨标本后，在显微 CT 图像上观察到骨小梁的走行特征，与 ATHAVALLE 等<sup>[27]</sup>用破坏性检测方法研究骨小梁薄片组的结果基本一致。Micro-CT 还可以通过三维重建、测量，获得骨小梁的空间结构及参数信息，减少标本的破坏度，提高标本的利用率，为医学研究提供更多的实验数据。

精确量化骨小梁微强度和微观结构之间的关联，可以分析骨小梁骨质量和骨小梁强度<sup>[28]</sup>。在载负荷下，骨小梁体积小、数量少的部位最先开始出现变形断裂，杆状骨小梁越多，应力集中范围越大，而板状及较大体积的骨小梁最后发生断裂塌陷<sup>[29-30]</sup>。结果显示，中和三角区主要走行杆状骨小梁，体积分数小，因此判断载负荷时，中和三角区的骨小梁最先发生断裂。

BV/TV 是衡量骨小梁微最主要的参数，与骨小梁表观最大应力、受力负荷、弹性、刚度等关系密切<sup>[31-32]</sup>。杨锐敏等<sup>[33]</sup>报道骨体积分数和微结构与松质骨的多轴力学性能有关，骨体积分数可以间接反映估值情况，相同载荷条件下，骨体积分数小的松质骨需要承受更大的应力，股骨颈外上侧作为骨量丢失最为显著的区域，在跌倒载荷下同样处于应力集中区域，在临床中常为骨折断裂的起点。结果显示，跟骨上部骨小梁的骨体积分数值最大，其次是跟骨结节部，其余部分的骨小梁的骨体积分数值相差不大。因此判断跟骨内力学性能存在差异，跟骨上部抗压缩能力最强，其次是跟骨结节部，最后是其他部位。在受到高冲击力时抗压缩能力差的部位易损伤，例如跟骨下前端、中和三角区等。

BS/TV、骨小梁厚度是衡量骨小梁微最常见的参数，BS/TV 反映骨量变化，骨小梁间隙、骨小梁数量与骨小梁厚度的计算紧密联系。骨小梁厚度结合骨小梁间隙、骨小梁数量可以判断骨质疏松程度，当发生骨质疏松时骨小梁厚度会降低、骨小梁间隙增大、骨小梁数量减小<sup>[34]</sup>。结果显示，跟骨上部骨小梁厚度最大，其余部分的骨小梁厚度相差不大，跟骨结节部 BS/TV 最大，中和三角 BS/TV 最小，骨小梁间隙在跟骨下部前端、中和三角区较大，其余部分的骨小梁间隙相差不大，跟骨结节部骨小梁数量最多，其余部分的骨小梁数量相差不大。因此推断跟骨下前部、中和三角的骨质较疏松，跟骨上部、跟骨结节的骨质较紧密。

综合以上结果，中和三角区主要分布杆状骨小梁，BS/TV 最小、BV/TV 较小、骨小梁间隙最大，该部位骨质较疏松，受到高冲击力时抗压缩能力差、骨小梁最先发生断裂，是易发生骨折的部位。该结果与 YU 等<sup>[35]</sup>绘制的跟骨内侧面、外

侧面骨折线地图基本一致。

**不足与展望：**此次研究样本量少，左侧、右侧跟骨数量不等，忽略了左、右侧的对比，同时忽略了性别、年龄、劳动强度及运动等对比，缺少跟骨力学分析，主要测量了BV/TV、BS/TV、骨小梁厚度、骨小梁间隙和骨小梁数量5个常见的骨小梁指标，对骨小梁的其他参数及相关性等未进行分析。未来将收集更多的跟骨标本及骨小梁数据，按年龄、性别、劳动强度及运动习惯等进行分类比较，并测量分析骨小梁的其他参数，将骨小梁与力学分析结合，为临床医生提供更多跟骨骨小梁的基础数据，进一步分析跟骨骨折发生的影响因素。

**致谢：**衷心感谢导师张少杰教授对论文的指导。

**作者贡献：**张凤珍负责实验设计、实施及撰写，张少杰负责审核。

**利益冲突：**文章的全部作者声明，在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

**开放获取声明：**这是一篇开放获取文章，根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享4.0”条款，在合理引用的情况下，允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展，同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献，并为之建立索引，用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

**版权转让：**文章出版前全体作者与编辑部签署了文章版权转让协议。

**出版规范：**该文章撰写遵守了国际医学期刊编辑委员会《学术研究实验与报告和医学期刊编辑与发表的推荐规范》。文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行3次文字和图表查重，文章经小同行外审专家双盲审稿，同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

#### 4 参考文献 References

- HALLINAN JTPD, WANG W, PATHRIA MN, et al. The peroneus longus muscle and tendon: a review of its anatomy and pathology. *Skeletal Radiol.* 2019;48(9):1329-1344.
- ALSAYEDNOOR J, METCALF L, ROCHESTER J, et al. Comparison of HR-pQCT- and microCT-based finite element models for the estimation of the mechanical properties of the calcaneus trabecular bone. *Biomech Model Mechanobiol.* 2018;17(6):1715-1730.
- CALLENS SJP, TOUROLLE NÉ BETTS DC, MÜLLER R, et al. The local and global geometry of trabecular bone. *Acta Biomater.* 2021;130:343-361.
- 徐光华, 刘鸿宇, 张立夫, 等. 跆拳道运动对跟骨骨皮质厚度与骨小梁应力分布的影响 [J]. *中国组织工程研究*, 2021,25(35):5582-5587.
- SAMELSON EJ, BROE KE, XU H, et al. Cortical and trabecular bone microarchitecture as an independent predictor of incident fracture risk in older women and men in the Bone Microarchitecture International Consortium (BoMIC): a prospective study [published correction appears in *Lancet Diabetes Endocrinol.* 2019;7(1):e1] [published correction appears in *Lancet Diabetes Endocrinol.* 2019 Jun;7(6):e18]. *Lancet Diabetes Endocrinol.* 2019;7(1):34-43.
- BERNHARDT R, KUHLISCH E, SCHULZ MC, et al. Comparison of bone-implant contact and bone-implant volume between 2D-histological sections and 3D-SRμCT slices. *Eur Cell Mater.* 2012;23:237-248.
- 马剑雄, 赵杰, 何伟伟, 等. 高分辨率外周定量计算机断层扫描评估骨小梁微结构和骨强度的研究进展 [J]. *生物医学工程学杂志*, 2018,35(3):468-474.
- SOLDATI E, ROSEREN F, GUENOUN D, et al. Multiscale Femoral Neck Imaging and Multimodal Trabeculae Quality Characterization in an Osteoporotic Bone Sample. *Materials (Basel).* 2022;15(22):8048.
- IBRAHIM N, PARSAA A, HASSAN B, et al. Comparison of anterior and posterior trabecular bone microstructure of human mandible using cone-beam CT and micro CT. *BMC Oral Health.* 2021;21(1):249.
- CLARK DP, BADEA CT. Advances in micro-CT imaging of small animals. *Phys Med.* 2021;88:175-192.
- 朱芳芳. CBCT 测量骨小梁孔隙率评价骨小梁结构的应用研究 [D]. 合肥: 安徽医科大学, 2021.
- SHEVROJA E, CAFARELLI FP, GUGLIELMI G, et al. DXA parameters, Trabecular Bone Score (TBS) and Bone Mineral Density (BMD), in fracture risk prediction in endocrine-mediated secondary osteoporosis. *Endocrine.* 2021;74(1):20-28.
- CHU L, HE Z, QU X, et al. Different subchondral trabecular bone microstructure and biomechanical properties between developmental dysplasia of the hip and primary osteoarthritis. *J Orthop Translat.* 2019; 22:50-57.
- ALMHADIE-IMJABBAR A, PODSIADLO P, LUJHAR R, et al. Trabecular bone texture analysis of conventional radiographs in the assessment of knee osteoarthritis: review and viewpoint. *Arthritis Res Ther.* 2021;23(1):208.
- YU YE, HU YJ, ZHOU B, et al. Microstructure Determines Apparent-Level Mechanics Despite Tissue-Level Anisotropy and Heterogeneity of Individual Plates and Rods in Normal Human Trabecular Bone. *J Bone Miner Res.* 2021; 36(9):1796-1807.
- 张喻磊, 胡家军, 王臻. 小切口解剖钢板联合加压螺钉微创术对跟骨关节内骨折患者足功能恢复的促进作用 [J]. *临床研究*, 2020,28(12):46-47.
- 田国富, 李君基, 李文杰. 人体跟骨模型的建立及其骨折力学研究 [J]. *机械设计与制造*, 2021(11):52-55.
- 林娟颖, 刘晓颖, 邢立杰, 等. 基于有限元法的跟骨生物力学分析 [J]. *医用生物力学*, 2018,33(1):37-41.
- GALLUZZO M, GRECO F, PIETRAGALLA M, et al. Calcaneal fractures: radiological and CT evaluation and classification systems. *Acta Biomed.* 2018;89(1-5):138-150.
- 魏霞, 刘海玉. 200 例健康体检者超声桡骨骨密度检测结果分析 [J]. *影像研究与医学应用*, 2020,4(2):144-145.
- NICOLIELO LFP, VAN DESSEL J, JACOBS R, et al. Relationship between trabecular bone architecture and early dental implant failure in the posterior region of the mandible. *Clin Oral Implants Res.* 2020;31(2):153-161.
- SAERS JPP, RYAN TM, STOCK JT. Baby steps towards linking calcaneal trabecular bone ontogeny and the development of bipedal human gait. *J Anat.* 2020;236(3):474-492.
- 徐光华, 刘鸿宇, 张立夫, 等. 跆拳道运动对跟骨骨皮质厚度与骨小梁应力分布的影响 [J]. *中国组织工程研究*, 2021,25(35):5582-5587.
- BURT LA, SCHIPILOW JD, BOYD SK. Competitive trampolining influences trabecular bone structure, bone size, and bone strength. *J Sport Health Sci.* 2016;5(4):469-475.
- VAN AS C, KOEDAM M, MCLUSKEY A, et al. Loss of Anti-Müllerian Hormone Signaling in Mice Affects Trabecular Bone Mass in a Sex- and Age-Dependent Manner. *Endocrinology.* 2022;163(11):bqac157.
- OKADA R, YAMATO K, KAWAKAMI M, et al. Low magnetic field promotes recombinant human BMP-2-induced bone formation and influences orientation of trabeculae and bone marrow-derived stromal cells. *Bone Rep.* 2021;14:100757.
- ATHAVALA SA, JOSHI SD, JOSHI SS. Internal architecture of calcaneus: correlations with mechanics and pathoanatomy of calcaneal fractures. *Surg Radiol Anat.* 2010;32(2):115-122.
- GONG H, WANG L, FAN Y, et al. Apparent- and Tissue-Level Yield Behaviors of L4 Vertebral Trabecular Bone and Their Associations with Microarchitectures. *Ann Biomed Eng.* 2016;44(4):1204-1223.
- 吴宇航, 郑利钦, 张彪, 等. 去势大鼠骨质疏松性骨小梁的压缩断裂仿真 [J]. *中国组织工程研究*, 2020,24(15):2387-2392.
- SANDINO C, MCERLAIN DD, SCHIPILOW J, et al. Mechanical stimuli of trabecular bone in osteoporosis: A numerical simulation by finite element analysis of microarchitecture. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2017;66:19-27.
- RIEGER R, AUREGAN JC, HOC T. Micro-finite-element method to assess elastic properties of trabecular bone at micro- and macroscopic level. *Morphologie.* 2018;102(336):12-20.
- MAQUER G, MUSY SN, WANDEL J, et al. Bone volume fraction and fabric anisotropy are better determinants of trabecular bone stiffness than other morphological variables. *J Bone Miner Res.* 2015;30(6):1000-1008.
- 杨锐敏, 吴文正, 郑永泽, 等. 不同松质骨体积分数影响股骨近端表面力学响应的有限元分析 [J]. *中国组织工程研究*, 2021,25(36):5765-5770.
- 沛泽, 罗守华, 陈功, 等. 基于 MicroCT 的骨小梁参数测量系统的应用效果分析 [J]. *中国医疗设备*, 2016,31(4):45-48+39.
- YU Q, LI Z, LI J, et al. Calcaneal fracture maps and their determinants. *J Orthop Surg Res.* 2022;17(1):39.

(责任编辑: ZJ, GD, ZN, QY)