

文章编号:1004-7220(2011)06-0527-07

## 脱钙过程中松质骨骨量、微结构和声学参数的相关性研究

牛海军, 邵晓宁, 王立, 田豪明, 刘诚睿, 李德玉, 樊瑜波

(北京航空航天大学 生物与医学工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 目的 研究脱钙过程中松质骨的超声声学参数、骨量和骨微结构的变化,以及骨量、骨微结构和声学参数的相关性。方法 15块长方体松质骨样本经脱脂后进行分阶段脱钙,对脱钙前样本和经每一阶段脱钙的样本进行Micro CT扫描和超声测量,计算得到脱钙过程中骨量与骨微结构参数和超声声学参数,对超声声学参数与骨量和骨微结构参数进行相关性分析。结果 随着松质骨样本钙的流失,骨密度、骨表面密度和骨小梁体积比不断降低,骨小梁形态参数(结构模型因子和骨小梁面积比)上升,骨小梁的厚度和数目下降,骨小梁间隙增大,各向异性程度上升;声传导速度先升后降,宽带超声衰减呈现轻微的下降趋势;松质骨的声学参数与骨密度和骨微结构都有较强的相关性。结论 超声声学参数不但与骨密度,而且和骨微结构相关,定量超声技术有望为基于超声的骨质疏松早期诊断技术的发展提供参考。

**关键词:** 超声; CT扫描; 骨密度; 微结构; 脱钙; 生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

## Correlation study on bone density, microstructure and acoustic parameters of cancellous bone at different stages of decalcification

NIU Hai-jun, SHAO Xiao-ning, WANG Li, TIAN Hao-ming, LIU Cheng-ru, LI De-yu, FAN Yu-bo (School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Objective To study changes and correlations in ultrasound acoustic parameters, bone density and microstructure of the cancellous bone at different stages of decalcification. Methods Fifteen defatted porcine cancellous bone specimens were decalcified at different decalcification stages, and the bone density, microstructure and acoustic parameters were measured by Micro CT and ultrasound system, respectively, before and after the decalcification. Correlations between acoustic parameters, bone density and microstructure were investigated. Results With the loss of calcium in bone specimens, BMD (bone mass density), BS/TV and BV/TV decreased continuously. Microstructure parameters SMI and BS/BV increased, while Tb.Th and Tb.N decreased with Tb.Sp increasing. Degree of anisotropy (DA) increased. Acoustic parameter SOS increased at first, and then decreased, with nBUA slightly decreasing. High correlation was found between acoustic parameters, BMD and bone microstructure parameters. Conclusions Ultrasound acoustic parameters are correlated with BMD and bone microstructure. This study may provide some reference information for the early diagnosis of osteoporosis based on ultrasound.

**Key words:** Ultrasound; CT scans; Bone mass density; Microstructure; Decalcification; Biomechanics

收稿日期:2011-04-11; 修回日期:2011-07-25

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划项目子课题“定量超声骨质疏松检测仪”(2009BAI79B03-9)。

通讯作者:樊瑜波, Tel: (010) 82339428; E-mail: yubofan@buaa.edu.cn。

骨质疏松患者的骨量减少、骨组织微结构受损、骨脆性增加、易骨折,生活质量降低,需要支出高额的医疗费用。调查显示,全世界约有2亿人患有骨质疏松;我国50岁以上骨质疏松患者约有7000万,低骨量人群约为2.1亿<sup>[1-2]</sup>。越来越多的学者开始关注骨质疏松的研究<sup>[3-4]</sup>,除了对离体骨进行力学评价外<sup>[5-6]</sup>,更对临床检测方法的进行探索。目前常用的临床检测方法有:X射线平片评估、双能X射线、定量计算机断层扫描(QCT)、磁共振、定量超声和核素骨显像。其中,X射线平片评估法一般在骨量丢失30%或50%以上时才可确诊,灵敏度差;双能X射线和QCT是目前被认为最准确的检测方法,但设备庞大且昂贵;除此之外,X射线具有放射性,不适合普查和持续不断的监测;这类设备在小型医院和社区医院也得不到普及,昂贵的检查费用也限制了大量人口的早期筛查。放射性核素骨显像用于诊断已有20多年,诊断的敏感性和特异性优于X射线,但操作复杂,不适于大量筛查。

近年来,价格便宜、无辐射及检测速度快的定量超声方法(QUS)已用于对骨质疏松的检测,并经过深入研究取得许多进展<sup>[7-9]</sup>。结果显示,超声声学参数,主要包括声传导速度(SOS)和宽带超声衰减(BUA)、硬度系数(SI,为BUA和SOS的线性组合)与骨矿密度(BMD)有较强的相关性,具有较好的诊断的能力<sup>[10-14]</sup>。尽管定量超声参数和骨密度密切相关,但这种相关性并未达到可以取代DXA的程度。主要原因之一是目前使用的超声骨密度仪仅仅运用声学参数来描述骨密度的变化;但实际上,骨组织的声学参数不仅与骨密度有关,而且与骨的微结构有关<sup>[15-16]</sup>。目前声学参数与骨量和骨微结构之间的关系并不明确,为了提高检测的准确性,有必要进行两者关系的探索<sup>[17-19]</sup>。

骨质疏松症以骨量降低、骨微结构退行性变和骨折的危险性增高为特征,真正的骨丢失是一个包括钙流失在内的复杂过程。为排除其他因素影响,本文采用对脱脂后松质骨样本进行化学脱钙的方法,利用Micro CT成像系统和A型超声系统,观测脱钙过程中松质骨样本骨量参数、骨微结构参数和超声声学参数的变化,进一步探索超声声学参数与骨量和骨微结构参数的相关性。该研究结果有望为基于超声的骨质疏松早期诊断技术的发展提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 样本准备

实验采用猪的胫骨(8月龄),切除胫骨头近端的皮质骨,保留松质骨,对松质骨进行切割。胫骨示意图和从胫骨近端获取的松质骨样本照片如图1所示。共15块长方体样本,来自于6根胫骨,样品的方向如图1中定义,其中左右方向(RL方向)的厚度切割后约为4 mm,所有样本沿相同方向切割。样本的测量面(即4 mm对应的面)用细砂纸打磨,相对面保持平行,打磨后的样品厚度在3.2~3.8 mm。切割好的样品用超声清洗的方法进行脱脂,脱脂后置于-20℃的冰箱保存待用。

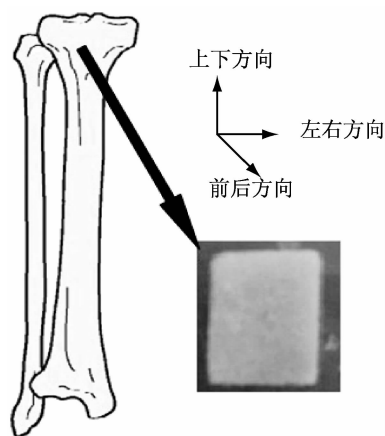


图1 胫骨示意图及松质骨样本

Fig.1 Sketch of the tibia and photo of the cancellous bone sample

### 1.2 实验系统

**1.2.1 Micro CT系统** 实验用Micro CT(Skyscan 1076)的空间分辨率为9 μm。设备参数:扫描电压70 kV,电流140 μA,能量为10 W。

**1.2.2 超声测量系统** 如图2所示,A型超声系统由宽带脉冲发射接收器(5800PR, Panametrics, 美国)、一对水浸式聚焦超声探头(V391-SU, Panametrics, 美国)、12位400兆AD采集卡(CompuScope 12 400, Gage, 加拿大)、计算机、采集软件、测试水槽和特制的样品平台组成。超声探头的中心频率为0.5 MHz,焦距38.1 mm,焦点直径4 mm,探头固定于实验用水槽的两端,在一条轴线上,间距为77 mm。

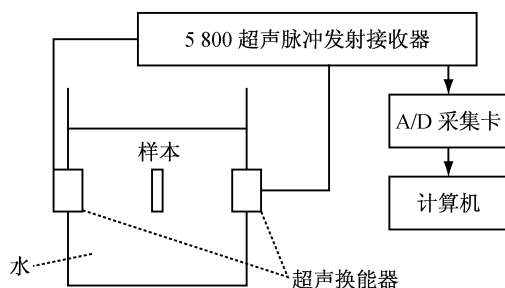


图2 超声测量系统  
 Fig.2 Ultrasound measurement system

### 1.3 实验

实验前,骨样本首先置于 25 °C 的生理盐水中解冻 2 h,随后进行脱钙、超声测量和 Micro CT 扫描。脱钙前的样品首先进行超声测量,测量时将样本浸入到 25 °C 的生理盐水中,进行搅拌使水渗入到松质骨组织内,去除组织内气泡。在骨平面内选择 8 个点进行超声测量,超声透射信号经放大、采集后存入计算机,采样频率 20 MHz。对 8 个点的超声信号分别进行处理,求取声速、声衰减等参数,8 个点的参数平均值作为该骨样品的声学参数值。

超声测量结束后进行 Micro CT 扫描,用泡沫板把样本固定在装满 PBS 缓冲液的离心管中,离心管用塑料制成,壁薄,对射线几乎无衰减,每次测量时使用相同离心管,保证测量条件的一致性,扫描结束后计算骨量和微结构参数。随后对骨样品进行 2 h 的脱钙,脱钙后对骨样本进行清洗,再次进行超声测量和 Micro CT 扫描,重复上述实验过程 3 次。实验流程如图 3 所示。考虑到脱钙过程会造成松质骨样本厚度的轻微变化,样本厚度将会影响声学参数的计算,故在脱钙前和每次脱钙后重新测量样本厚度。

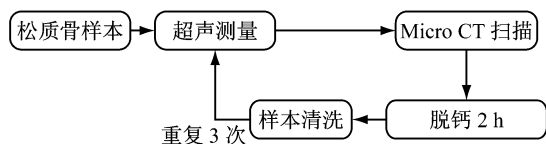


图3 松质骨脱钙、超声检测和 Micro CT 检测流程  
 Fig.3 Flow chart of decalcification, ultrasound and Micro CT measurement for the cancellous bone

### 1.4 参数计算

1.4.1 骨量及骨微结构参数 Micro CT 扫描数据用配套软件(NRecon)进行图像重建,重建后的图像

以中心直径为 4 mm 的圆柱体作为感兴趣区,运用专用软件计算骨矿密度和骨微结构参数,主要包括骨密度、骨小梁体积比(BV/TV)、骨表面密度(BS/TV)、骨小梁面积比(BS/BV)、骨小梁厚度(Tb.Th)、骨小梁数目(Tb.N)、骨小梁间隙(Tb.Sp)、结构模型因子(SMI)和各向异性系数(DA)。

1.4.2 超声声学参数 用于骨质疏松检测的主要声学参数包括:超传播速度(SOS)、宽带衰减系数(BUA)和硬度系数 SI,参数的计算方法如下:

$$SOS = \frac{L}{(L/c_w - \Delta t)} \quad (1)$$

$$c_w = 1402.9 + 4.835 \cdot T - 0.047 \cdot T^2 + 127.25 \times 10^{-6} \cdot T^3 \quad (2)$$

$$SI = 0.67 \cdot nBUA + 0.287 \cdot SOS - 420 \quad (3)$$

式中: $L$ 为骨样本在超声传播路径上的厚度。 $\Delta t$ 为超声单纯在水中传播和加松质骨样本后透射信号第一个峰值后的过零点的时间差。 $C_w$ 为水中的声速, $C_w$ 受水的温度  $T$  影响较大,实验过程中水温保持在 25 °C。先分别计算超声经水传播和浸入样本后的超声透射信号的功率谱,并计算得到功率衰减值在各个频率段的分布,对特定频率段衰减取值线性拟合,拟合曲线的斜率即为宽带超声衰减系数(单位为 dB/MHz),0.5 MHz 超声换能器的信号频率区间选取 300 ~ 600 kHz。为了减小厚度对 BUA 的影响,用 BUA 除以样本厚度,得到归一化宽带超声衰减系数 nBUA,单位 dB/(cm · MHz)。

### 1.5 统计方法

对所有描述骨量、骨微结构的参数和声学参数之间的相关性作了 Pearson 相关分析,分析软件采用了 SPSS 16.0,显著性水平设为 0.01 和 0.05。

## 2 结果

### 2.1 脱钙过程中骨量与骨微结构参数变化

松质骨样本在脱钙前、脱钙 2、4、6 h 松质骨样本的 CT 图像如图 4 所示。可以明显看出,随着脱钙时间的延长,松质骨的骨小梁结构逐渐破坏,骨小梁之间的连接性变差,游离末端增多。

表 1、2 列出了所有样本在脱钙过程中骨量与骨微结构参数的平均变化趋势。可以看出,随着钙的流失,反映骨量的参数,如 BMD、BS/TV 和 BV/TV 不断降低,表明骨量不断下降。用于描述骨小梁形

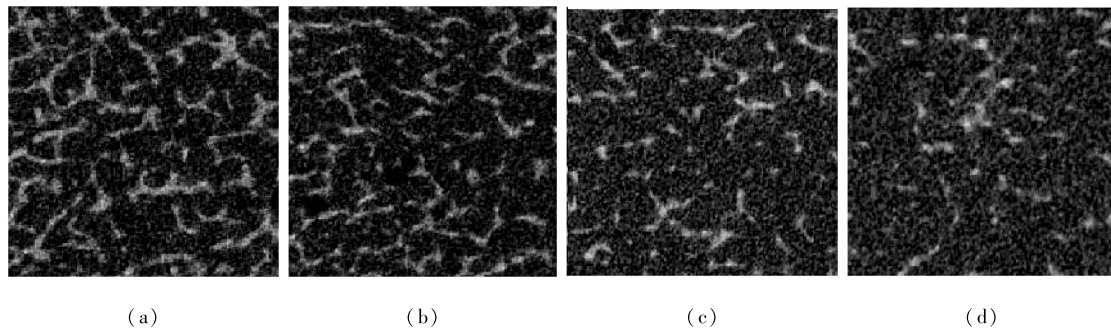


图4 脱钙过程中的松质骨样本 Micro CT 扫描图像 (a) 脱钙前, (b) 脱钙 2 h, (c) 脱钙 4 h, (d) 脱钙 6 h

Fig. 4 Micro CT images of the cancellous bone at different decalcification stages (a) Before decalcification, (b) 2 h after decalcification, (c) 4 h after decalcification, (d) 6 h after decalcification

态的参数,如 SMI 和 BS/BV 不断上升,说明骨小梁连接性变差,游离末端增多。用于描述骨小梁结构的参数,如 Tb. Th 和 Tb. N 也不断下降, Tb. Sp 增大, DA 不断上升。

## 2.2 脱钙过程中超声声学参数变化

表 3 列出了在脱钙的不同阶段所有 15 个松质

骨样本超声声学参数的平均值。可以看出,在脱钙初始的 2 h,样本组织中的声速 SOS 稍有上升;随着脱钙的进一步进行,又呈现不断下降的趋势。在整个脱钙过程中,宽带超声衰减 nBUA 的值有所降低。SOS 与 BUA 的线性组合参数 SI,变化趋势与声速 SOS 的变化基本相同。

表 1 不同脱钙阶段松质骨样本的骨量参数

Tab.1 Bone mass parameters of the cancellous bone at different decalcification stages

骨量参数	脱钙时间/h			
	0	2	4	6
BMD/(g · cm <sup>-2</sup> )	0.47 ± 0.06	0.45 ± 0.07	0.40 ± 0.10	0.36 ± 0.10
$\frac{BV}{TV}/\%$	44.12 ± 12.15	40.68 ± 14.09	32.6 ± 18.82	26.32 ± 19.38
$\frac{BS}{TV}/\text{mm}^{-1}$	7.28 ± 0.63	7.07 ± 0.73	6.42 ± 1.89	5.66 ± 2.56

表 2 不同脱钙阶段松质骨样本的微结构参数

Tab.2 Microstructure parameters of the cancellous bone at different decalcification stages

骨微结构参数	脱钙时间			
	0	2	4	6
$\frac{BS}{BV}/\text{mm}^{-1}$	17.90 ± 4.65	19.63 ± 4.88	21.09 ± 6.53	24.09 ± 7.03
SMI	0.86 ± 0.59	1.13 ± 0.72	1.63 ± 1.05	2.05 ± 1.18
Tb. Th/ μm	0.22 ± 0.04	0.21 ± 0.04	0.19 ± 0.03	0.18 ± 0.03
Tb. N/ mm <sup>-1</sup>	2.15 ± 0.41	1.92 ± 0.50	1.65 ± 0.59	1.39 ± 0.81
Tb. Sp/ μm	0.29 ± 0.08	0.30 ± 0.10	0.34 ± 0.10	0.37 ± 0.12
DA	1.67 ± 0.32	1.71 ± 0.46	1.81 ± 0.46	1.83 ± 0.55

## 2.3 相关性分析

表 4、5 分别描述了超声声学参数与描述骨量的参数和骨微结构参数的相关系数。声速 SOS 与骨量参数的相关性高于 nBUA 参数,而两者的线性组合参数 SI 与骨量参数的相关性最好。

## 3 讨论

本文研究了化学脱钙过程中松质骨样本的骨量、骨微结构和超声声学参数的变化,探索了声学参数与骨量和骨微结构参数的相关性。

表3 不同脱钙阶段松质骨样本的超声声学参数

Tab.3 Ultrasound acoustic parameters of the cancellous bone at different decalcification stages

	脱钙前	脱钙 2 h	脱钙 4 h	脱钙 6 h
SOS/(m · s <sup>-1</sup> )	1768 ± 153	1778 ± 137	1752 ± 166	1629 ± 167
nBUA/[dB · (MHz <sup>-1</sup> · cm) <sup>-1</sup> ]	-22.76 ± 6.12	-27.18 ± 6.54	-29.99 ± 8.26	-33.01 ± 10.13
SI	68.59 ± 10.16	71.37 ± 11.99	59.17 ± 15.38	28.22 ± 17.06

表4 超声声学参数与骨量相关参数相关系数

Tab.4 Correlation between ultrasound acoustic parameters and bone mass parameters

	BMD	BS/TV	BV/TV
SOS	0.686 **	0.535 **	0.620 **
nBUA	0.567 *	0.534 *	0.612 **
SI	0.773 **	0.735 **	0.799 **

注:\*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关,\* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

表5 超声声学参数与骨微结构参数相关系数

Tab.5 Correlation between ultrasound acoustic parameters and bone microstructure parameters

	SOS	nBUA	SI
SMI	-0.528 **	-0.341 **	-0.588 **
BS/BV	-0.486 **	-0.315 **	-0.543 **
Tb. N	0.380 **	0.283 *	0.549 **
Tb. Sp	-0.236 *	-0.426 **	-0.453 **
Tb. Th	0.401 **	0.299 **	0.538 **
DA	0.017	-0.106	-0.129

注:\*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关,\* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

作为一种组织检测工具, Micro CT 既能测量骨矿密度, 又能描述骨微结构和骨几何形态特征。实验结果显示, 随着钙的流失, 骨量参数值不断减小(如 BMD、BS/TV 和 BV/TV), 表明骨矿含量不断下降; 相反, 用于描述骨小梁形态的参数值不断增加(如 SMI、BS/BV)。这些形态参数的变化说明, 随着钙含量的减少, 骨小梁的连接性变差。SMI 反映了骨小梁棒状结构和板状结构的比例, 随着钙的流失, 骨小梁结构由板状结构向棒状结构转化。从图 4 也能看出骨小梁的游离末端增多, 用于描述骨小梁结构的参数, 如 Tb. Th 和 Tb. N 不断下降, Tb. Sp 增大, DA 上升。

以前的研究者通过对尸体骨样本的测量发现, 骨质疏松情况下, 骨密度将下降, 骨内的孔隙增大, 松质骨的骨小梁变稀疏, 会造成 SOS 的降低<sup>[14-20]</sup>。但本文的脱钙实验发现, 在进行了 2 h 的初步脱钙后, SOS 的值首先会升高, 随着进一步的钙流失, SOS 又开始呈现逐渐下降的趋势, 所有样本的 SOS 的变化趋势基本一致, 这种现象不容易被解释。初步认为可能在脱钙初期, 松质骨的空隙较小, 钙离子虽然已经与螯合物结合, 但仍停留在骨小梁表面或者骨小梁间隙中, 造成了 SOS 的上升; 但是随着脱钙程度的深入, 这些物质从空隙中排出, 空间被水填充, 造成了随后 SOS 的下降。经过 6 h 的脱钙实验, SOS 的变化约为有 8%, SOS 变化较小的原因有: ①脱钙时间短, 钙量的变化对 SOS 影响较小; ②化学脱钙对有机成分的破坏较小, 而 SOS 的变化与有机成分的含量也有较大关系。

以前的研究显示<sup>[22-26]</sup>, 超声衰减与超声波的频率有密切关系。当超声频率确定后, 对于松质骨来说, 超声衰减系数主要受骨矿密度和骨微结构的影响。骨的声衰减主要由骨对声波的吸收和散射造成, 骨矿密度越高, 声吸收越大; 骨小梁网络分布越致密, 声衰减越大。当发生骨质疏松症时, 由于骨矿含量降低引起骨密度减小, 骨小梁网络变得稀疏, 声吸收和散射减少, 宽带衰减则变小。本实验结果显示, 随着钙的流失, 宽带超声衰减 nBUA 呈现轻微的下降趋势, 但是不同样本之间的 nBUA 差异较大。大量研究表明<sup>[8]</sup>, SOS 和 BUA 的线性组合 SI 比单个的 SOS 或 BUA 具有更强的诊断能力, 本实验中 SI 的变化趋势与 SOS 基本相同。在进行了 2 h 的初步脱钙后, SI 会出现小幅的上升, 随后随着进一步的钙流失, SI 又开始呈现下降趋势。

从表 4 中可以看出, 骨量参数和所有声学参数相关, 其中 SOS 与骨量参数的相关性高于 nBUA 参数, 而两者的线性组合 SI 与骨量参数的相关性最

好,但相关系数都不高,说明超声参数测量值并不能完全反映骨矿物质的含量。在骨量参数中,3个声学参数和BV/TV的相关性最好。表5描述了超声声学参数与骨微结构参数的相关性,SOS与SMI的相关性最高,两者为负相关,说明随着骨小梁结构从板状向棒状的转变,SOS的值逐渐减小。与SOS参数相比,nBUA参数与微结构的相关性较低。线性组合参数SI与微结构参数的相关程度高于SOS和nBUA,该结果与先前的研究结果一致,表明SI比单个的SOS或nBUA参数具有更强的骨质疏松诊断能力。一些研究者认为<sup>[14,20-21]</sup>,SOS参数主要反映骨的结构,这与本文的实验结果基本一致,说明SOS参数对于松质骨骨量的反映优于对骨结构的反映。

一般认为,骨质疏松所致骨强度的变化约有70%~75%是由骨矿密度决定的,其余25%~30%由骨微结构变化引起的;因此,骨密度测量并不能全面反映骨质疏松状况。本文结果提示:骨组织的超声声学参数不仅与骨矿密度相关,而且与骨的微结构相关,不同的超声参数反映骨矿密度和骨微结构的能力不同。当然,本研究也有一定的局限性。首先,化学脱钙方法与真正的骨钙丢失过程有一定差异。真正的骨丢失包含无机和有机成分的同步变化,而化学脱钙对胶原构成的有机微结构的破坏很小;因此,对无机成分敏感的Micro CT设备关于微结构的测量结果可能并不是特别准确。这种情况在真实尸体骨的研究中也同样存在,后续研究应考虑如何减小微结构测量的误差,并采用不同阶段的动物骨松样本进行实验,与化学脱钙方法的结果进行对比。其次,在临床检测时,超声不但要穿越松质骨,而且要穿越肌肉层和皮质骨层。虽然发生骨质疏松症时,松质骨的变化远大于皮质骨的变化,但肌肉与皮质骨组织对超声检测的准确性的影响是不能被忽视的。第三,尽管目前的研究结果显示,超声声学参数与骨量和骨微结构密切相关,不同的超声参数反映骨矿密度和骨微结构的能力不同,但两者之间的真正定量关系还需要进一步探索,以建立更精确的关系模型,最终提高超声对骨质疏松和骨折风险评价的准确率。

#### 参考文献:

- [1] Reginster JY, Burlet N. Osteoporosis: A still increasing prevalence [J]. *Bone*, 2006, 38(2): S4-9.
- [2] 中华医学会骨质疏松和骨矿盐疾病分会. 原发性骨质疏松症诊治指南(2011年) [J]. *中华骨质疏松和骨矿盐疾病杂志*, 2011, 4(1): 2-17
- [3] Kazakia G, Majumdar S. New imaging technologies in the diagnosis of osteoporosis [J]. *Rev Endocr Metab Disord*, 2006, 7(1): 67-74.
- [4] Glenville M. *Osteoporosis: The silent epidemic* [M]. Wells: St Andrew's Press, 1998.
- [5] 马信龙, 付鑫, 马剑雄, 等. 股骨头内松质骨空间分布和力学性能变化有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2010, 25(6): 465-470.  
Ma XL, Fu X, Ma JX, et al. Finite element study on spatial distribution and mechanical properties of cancellous bone from femoral head [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(6): 465-470.
- [6] 顾冬云, 陈亚珠. 骨质疏松性骨力学性能的预测研究[J]. *医用生物力学*, 2009, 24(1): 70-73.  
Gu DY, Chen YZ. Prediction of Biomechanical properties of osteoporosis bone [J]. *J Med Biomech*, 2009, 24(1): 70-73.
- [7] Glüer CC. Quantitative ultrasound techniques for the assessment of osteoporosis: Expert agreement on current status [J]. *J Bone Miner Res*, 1997, 12(8): 1280-1288.
- [8] Prins SH, Jurgensen HL, Jurgensen LV, et al. The role of quantitative ultrasound in the assessment of bone; a review [J]. *Clin Physiol*, 1998, 18(1): 3-17.
- [9] Chen T, Chen PJ, Fung CS, et al. Quantitative assessment of osteoporosis from the tibia shaft by ultrasound techniques [J]. *Med Eng Phys*, 2004, 26(2): 141-145.
- [10] Seung H, Medige J, Ziv I. Combined models of ultrasound velocity and attenuation for predicting trabecular bone strength and mineral density [J]. *Clin Biomech*, 1996, 11(6): 348-353.
- [11] Pluskiewicz W, Drozdowska B. Ultrasonic measurement of the calcaneus in Polish normal and osteoporotic women and men [J]. *Bone*, 1999, 24(6): 611-617.
- [12] Lee KI, Roh HS, Yoon SW. Correlations between acoustic properties and bone density in bovine cancellous bone from 0.5 to 2 MHz [J]. *J Acoust Soc Am*, 2003, 113(5): 2933-2938.
- [13] Jenson F, Padilla F, Bousson V, et al. In vitro ultrasonic characterization of human cancellous femoral bone using transmission and backscatter measurements: Relationships to bone mineral density [J]. *J Acoust Soc Am*, 2006, 119(1): 654-663.
- [14] Njeh CF, Hodgkinson R, Currey JD, et al. Orthogonal relationships between ultrasonic velocity and material properties of bovine cancellous bone [J]. *Med Eng Phys*, 1996,

- 18(5): 373-381.
- [15] Kleerekoper M, Villanueva AR, Stanciu J, *et al.* The role of three-dimensional trabecular microstructure in the pathogenesis of vertebral compression fractures [J]. *Calcif Tissue Int*, 1985, 37(6): 594-597.
- [16] Glüer CC, Wu CY, Jergas M, *et al.* Three quantitative ultrasound parameters reflect bone structure [J]. *Calcif Tissue Int*, 1994, 55(1): 46-52.
- [17] Tavakoli MB, Evans JA. The effect of bone structure on ultrasonic attenuation and velocity [J]. *Ultrasonics*, 1992, 30(6): 389-395.
- [18] Strelitzki R, Evans JA, Clarke AJ. The influence of porosity and pore size on the ultrasonic properties of bone investigated using a phantom material [J]. *Osteoporos Int*, 1997, 7(4): 370-375.
- [19] Padilla F, Jenson F, Bousson V, *et al.* Relationships of trabecular bone structure with quantitative ultrasound parameters: In vitro study on human proximal femur using transmission and backscatter measurements [J]. *Bone*, 2008, 42(6): 1193-1202.
- [20] Wear KA. The dependence of time-domain speed of sound measurements on center frequency, bandwidth, and transit-time marker in human calcaneus in vitro [J]. *J Acoust Soc Am*, 2007, 122(1): 636-644.
- [21] Wear KA. Ultrasonic scattering from cancellous bone: a review [J]. *IEEE Trans UFFC*, 2008, 55(7): 1432-1441.
- [22] Wear KA. Ultrasonic attenuation in human calcaneus from 0.2 to 0.7 MHz [J]. *IEEE Trans UFFC*, 2001, 48(2): 602-608.
- [23] Chappard C, Laugier P, Fournier B, *et al.* Assessment of the relationship between broadband ultrasound attenuation and bone mineral density at the calcaneus using BUA imaging and DXA [J]. *Osteoporos Int*, 1997, 7(4): 316-322.
- [24] Hoffmeister BK, Whitten SA, Rho JY. Low megahertz ultrasonic properties of bovine cancellous bone [J]. *Bone*, 2000, 26(6): 635-642.
- [25] Serpe L, Rho JY. The nonlinear transition period of broadband ultrasound attenuation as bone density varies [J]. *J Biomech*, 1996, 29(7): 963-966.
- [26] Chaffai S, Padilla F, Berger G, *et al.* In vitro measurement of the frequency dependent attenuation in cancellous bone between 0.2 and 2.0 MHz [J]. *J Acoust Soc Am*, 2000, 108(3): 1281-1289.

## 《医用生物力学》杂志征稿、征订启事

《医用生物力学》杂志由上海交通大学主办,教育部主管,是国内唯一一本公开发行,积极反映医学生物力学基础研究与应用研究成果,推动国内外学术交流,促进医、理、工各学科相互了解和合作为目的学术性刊物。报道内容主要包括医学生物力学领域中有关固体力学、流体力学、流变学、运动生物力学等方面的研究论文。本刊为美国工程索引(Ei Compendex)收录期刊(收录时间从2010年1月起)、“中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)”。

本刊为双月刊,16开本,112页,国内统一连续出版物号CN 31-1624/R,国际标准连续出版物号ISSN 1004-7220;定价每期15元,全年90元,由邮局向全国征订发行,邮发代号4-633。读者可在附近邮局订阅或拨打“11185”热线电话通过邮政“11185”客户服务中心电话订阅。欢迎广大读者、作者订阅本刊,踊跃来稿。

地址:上海市制造局路639号 200011;

电话:(021)23271133; 传真:(021)63137020; 电子信箱:shengwulixue@gmail.com

网站:www.medbiomechanics.com, www.mechanobiology.cn