

文章编号:1004-7220(2014)03-0260-06

# 椎体骨微结构参数与椎弓根螺钉固定强度的相关性

李旭升, 高明暄, 梁晓燕, 李生贵, 邵宏斌, 杨世成

(兰州军区兰州总医院 骨科, 全军创伤骨科研究所, 兰州 730050)

**摘要:** **目的** 测量不同骨密度(bone mineral density, BMD)条件下椎体松质骨显微结构参数,并与椎弓根螺钉拔出力作相关性分析,以了解与螺钉稳定性相关的骨显微结构参数,进一步明确螺钉松动的原因。**方法** 采用新鲜尸体脊柱标本,根据 BMD 检测结果,按临床诊断标准分为骨质正常、骨量减少、骨质疏松和重度骨质疏松 4 个水平。然后植入椎弓根螺钉,进行螺钉轴向拔出实验,测定最大拔出力(maximum pullout strength, MPS)。收集螺钉拔出实验后椎体标本,在椎体中央部钻取松质骨柱状样本,对样本进行显微 CT 扫描,获取椎体松质骨显微结构参数,并进行各项指标的不同 BMD 水平间的比较分析,在了解这些指标随骨质疏松程度加重的变化规律的基础上,再对骨显微结构参数与所对应的螺钉 MPS 开展相关性分析。**结果** BMD 水平从正常下降到重度疏松程度,MPS 随之显著性下降。随 BMD 水平的依梯次下降,即骨质疏松程度进行性加重,椎体松质骨显微结构参数发生相应明显变化,存在 BMD 水平间的显著性差异。广泛的相关性存在于 BMD、显微 CT 参数和螺钉 MPS 指标之间。其中,螺钉 MPS 与显微 CT 扫描所得的骨体积分数(BV/TV)、骨小梁厚度(Tb. Th)和骨小梁间隙(Tb. Sp)呈高度相关性。**结论** 随 BMD 下降,骨组织会同时发生质的退变;螺钉 MPS 与部分骨显微结构参数高度相关。

**关键词:** 骨质疏松; 椎弓根螺钉; 骨密度; 骨微结构

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

## The relationship between microstructure of vertebral cancellous bone and fixation strength of pedicle screws

LI Xu-sheng, GAO Ming-xuan, LIANG Xiao-yan, LI Sheng-gui, SHAO Hong-bin, YANG Shi-cheng (Department of Orthopedics, Lanzhou General Hospital of Lanzhou Military Command, Institute of Traumatology and Orthopedics, Lanzhou 730050, China)

**Abstract: Objective** By measuring the microstructure parameters of cancellous bone in vertebral bodies with different bone mineral density (BMD) levels, to study the correlation between such parameters and the corresponding maximum pullout strength (MPS) when fixed by pedicle screws, so as to understand if the microstructure parameters are related with screw stability and further to reveal the cause of screw loosening. **Methods** Based on the BMD detection results, fresh human cadaver spines were stratified into four levels: normal, osteopenia, osteoporosis and severe osteoporosis, according to diagnosis criteria in clinic. The corresponding vertebral specimens were then instrumented with pedicle screws, and screw pullout tests were conducted to measure the MPS of such screws. All the vertebral specimens were collected subsequently, and the cancellous bone cylinders were drilled from the center of each vertebra for micro-CT scanning. Microstructure parameters of the vertebral trabecular bone at different BMD levels were obtained to investigate the interrelationships in between, and the relationships between the microstructure parameters and corresponding MPS of pedicle screws with osteoporosis severity were then compared. **Results** With the decline of BMD from normal to severe osteoporosis level, the corresponding MPS of pedicle screws was significantly declined. With the severity of osteoporosis increasing, the progressive bone volume loss, mechanical incompetence and microstructure deterioration also appeared evidently. Significant differences were found in microstructure parameters at different BMD levels. Strong correlations were

收稿日期:2013-04-19; 修回日期:2013-07-14

通信作者:高明暄, 主治医师, E-mail: mingxuanguo77@163.com。

extensively observed among BMD, microstructure parameters and MPS of screws. The MPS of pedicle screws was highly correlated with bone volume over total volume (BV/TV), trabecular thickness (Tb.Th) and trabecular separation (Tb.Sp) from micro-CT scanning. **Conclusions** Significant deterioration would occur in bone tissues with the decline of BMD level, and the MPS of pedicle screws was highly correlated with some microstructure parameters.

**Key words:** Osteoporosis; Pedicle screw; Bone mineral density(BMD); Bone microstructure

骨质疏松的病理改变不仅是骨量的减少,还有骨质的退变<sup>[1-2]</sup>,“质”变的体现之一是骨微结构参数的改变。目前临床上,骨密度(bone mineral density, BMD)仍是术前判断椎弓根螺钉内固定稳定性,以及是否采用螺钉强化措施的主要依据。BMD是由双能X线骨密度仪用二维透射原理反映骨的三维信息,仅能反映骨量<sup>[3-4]</sup>;显然,仅靠BMD并不能全面反映骨质信息,相应依此而所作出的椎弓根螺钉稳定性的预判也是片面的,这就需要采用多种手段对骨质改变进行综合评价,以更好地指导临床应用椎弓根螺钉,避免因螺钉松动而导致手术失败等严重后果。本研究旨在获取不同BMD水平的椎体松质骨微结构参数,并分析椎体松质骨微结构与椎弓根螺钉稳定性的关系。

## 1 方法

### 1.1 椎弓根螺钉拔出实验

选择符合临床诊断标准<sup>[5]</sup>的正常骨质、骨量减少、骨质疏松、严重骨质疏松的新鲜尸体脊柱标本各2具(T12-L5节段),其中男2具,女6具;年龄46~81岁,平均(62.25 ± 11.95)岁,标本由第四军医大学解剖教研室提供,应用中遵守相关法规及伦理学规定。正、侧位X线排除椎体潜在病变及严重畸形。BMD检测采用双能量X线吸收骨密度仪(Lunar Prodigy, GE医疗集团,美国),前后位检测并记录每个椎体BMD。然后,分离成单个椎体,以Mag-erl法<sup>[6]</sup>随机在椎体的一侧椎弓根置入椎弓根螺钉(SINO,美敦力威高骨科器械,中国)。置钉完成后,用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)包埋,包埋中确保PMMA不与螺钉接触,避免拔出时影响结果。将标本常温下放置24h进行椎弓根螺钉轴向拔出实验。标本加载于材料实验机(AG-IS,岛津公司,日本),保持牵引力轴与螺钉长径在一条线上,即轴向拔出,

均速5 mm/min,拔出螺钉,在载荷/位移曲线上定义:由上升猛然转为下降的拐点所对应的载荷,即为螺钉拔出过程中所受最大轴向拔出力(maximum pullout strength, MPS)(见图1)。



图1 椎弓根螺钉拔出实验

Fig.1 Pedicle screw pullout test

### 1.2 椎体松质骨标本显微CT(micro-CT)扫描

螺钉拔出后收集椎体标本,用一内径为14.0 mm的环锯,在电钻机床(Z3040摇臂钻床,中捷钻床厂,中国)上取样,沿头尾方向,垂直椎体上终板,以椎体体部的长、短径的交点为圆心取样。取椎体松质骨柱状样本后,行micro-CT(eXplore Locus SP, GE公司,美国)扫描。定义参数如下<sup>[7]</sup>:结构模型指数(structural model index, SMI),反映为骨小梁板状(plate-like)和杆状(rod-like)的程度,SMI数值板状骨小梁为0,杆状为3。骨表面积和骨体积的比值(surface to volume ratio, BS/BV),单位( $\text{mm}^{-1}$ )。相对骨体积(bone volume over total volume, BV/TV)或称骨体积分数(bone volume fraction, BVF),单位(%)。骨小梁厚度(trabecular thickness, Tb.Th)为骨小梁的平均厚度,单位(mm)。骨小梁数量(trabecular number, Tb.N)为一定长度内骨组织与非骨

组织的交点数量,单位( $\text{mm}^{-1}$ )。骨小梁分离度(trabecular separation, Tb. Sp)为小梁髓腔平均宽度,单位(mm)。采用三维重建处理软件 Micview 2.1.2和专用骨骼分析软件 Advanced Bone Analysis (ABA)。扫描协议:44 mm tube\_21  $\mu\text{m}$ \_270 min\_ss。扫描参数:扫描分辨率 21  $\mu\text{m}$ ,旋转角度  $360^\circ$ ,旋转角度增量  $0.4^\circ$ ,电压 80 kV,电流 80  $\mu\text{A}$ ,曝光时间 3 s,帧平均数为 4,像素组合为  $1 \times 1$ 。扫描校正:黑白扫描校正;Hounsfield 刻度校正;重建条纹标准化校正。分析测试条件:ROI 类型、大小及选取部位,目标分割值。

### 1.3 统计学方法

参数表示为均数  $\pm$  标准差的形式,所有数据录入 SPSS 11.0 软件分析。不同 BMD 水平间比较采用单因素方差分析(ANOVA)和 SNK- $q$  检验。椎体 BMD、微结构参数与椎弓根螺钉 MPS 的关系采用 Pearson's 相关分析。显著性差异水平定为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果

### 2.1 骨密度及最大拔出力

正常骨质、骨量减少、骨质疏松和重度疏松 4 个水平的椎体 BMD、椎弓根螺钉 MPS 的测量结果见表 1。任何 2 个水平的 BMD 之间均存在显著性差异( $P < 0.01$ );相对正常骨质,其他 3 个水平 BMD 依次下降 20.0%、30.91% 和 49.09%。随 BMD 水平从正常到重度骨质疏松梯次下降,椎弓根螺钉 MPS 也呈梯度性下降,任意 2 组之间比较均有显著性差异( $P < 0.01$ )。

表 1 BMD 与螺钉 MPS 关系比较

Tab. 1 Correlation between BMD and MPS of pedicle screws

	正常骨质	骨量减少	骨质疏松	重度疏松
BMD/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	$1.10 \pm 0.07$	$0.88 \pm 0.06$	$0.76 \pm 0.08$	$0.56 \pm 0.09$
MPS/N	$1594.68 \pm 159.91$	$1226.51 \pm 188.75$	$1019.21 \pm 170.39$	$686.55 \pm 154.60$

注: BMD、MPS 任意两组间均存在显著性差异( $P < 0.01$ )

### 2.2 micro-CT 扫描指标

表 2 列出了不同 BMD 分层水平的 micro-CT 扫描参数结果。随 BMD 由正常向重度疏松水平进行性下降, BV/TV、Tb. Th 和 Tb. N 值也降低;相反, SMI、BS/BV 和 Tb. Sp 3 个指标呈不同程度的上升。SMI、BV/TV 在不同 BMD 水平间均存在显著性差异( $P < 0.05$ )。Tb. Th 除骨量减小和骨质疏松两个水平比较无显著性差异( $P > 0.05$ ),其他任何两水平间比较均可发现显著性差异( $P < 0.05$ )。对 BS/BV 和 Tb. N 来说,仅正常和骨量减少水平之间的差异无统计学意义( $P > 0.05$ ),其余任何 2 个水平间比较差异均存在显著性( $P < 0.05$ )。正常水平和骨量减少、骨量减少与骨质疏松间的 Tb. Sp 比较无显著性差异( $P > 0.05$ ),但正常与骨质疏松、重度疏松间均存在显著性差异( $P < 0.05$ )。

表 2 不同 BMD 水平椎体松质骨显微 CT 扫描参数

Tab. 2 Microstructure parameters of the vertebral cancellous bone at four BMD levels

	正常骨质	骨量减少	骨质疏松	重度疏松
SMI	$0.73 \pm 0.17$	$1.20 \pm 0.19$	$1.71 \pm 0.22$	$2.06 \pm 0.25$
BV/TV/%	$32.96 \pm 3.75$	$26.94 \pm 3.97$	$22.89 \pm 2.75$	$20.72 \pm 3.67$
BS/BV/ $\text{mm}^{-1}$	$18.41 \pm 1.59^{**}$	$19.05 \pm 2.22^*$	$22.82 \pm 1.95$	$24.99 \pm 2.39$
Tb. Th/mm	$0.21 \pm 0.02$	$0.18 \pm 0.03^{**}$	$0.16 \pm 0.03^*$	$0.11 \pm 0.02$
Tb. N/ $\text{mm}^{-1}$	$1.47 \pm 0.10^{**}$	$1.21 \pm 0.32^*$	$1.12 \pm 0.11$	$0.84 \pm 0.44$
Tb. Sp/mm	$0.62 \pm 0.15^T$	$0.80 \pm 0.19^\Delta$	$0.92 \pm 0.20^T$	$1.30 \pm 0.25$

注:任何一指标不同 BMD 水平间均存在显著性差异( $P < 0.05$ ),但是,“\*\*” vs. “\*”,“ $^T$ ” vs. “ $^\Delta$ ”,“ $^\Delta$ ” vs. “ $^T$ ”时  $P > 0.05$

### 2.3 相关性分析

表 3 列出了椎体 BMD、椎体松质骨显微结构参数与螺钉 MPS 行相关分析的结果。BMD 与椎体松质骨显微结构参数存在广泛的显著相关性( $0.541 < R^2 < 0.742$ )。螺钉 MPS 与 BMD、松质骨显微结构参数存在显著相关性( $0.590 < R^2 < 0.882$ );其中, MPS 与 BV/TV、Tb. Th、Tb. Sp 等相关系数  $R^2 > 0.75$ (见图 2)。

表3 BMD、骨显微结构参数与螺钉 MPS 之间的相关系数

Tab.3 Correlations between BMD, microstructure parameters and MPS of pedicle screws

		BMD	SMI	BV/TV	BS/BV	Tb. Th	Tb. N	Tb. Sp	MPS
BMD	$R^2$	1.000	0.647	0.742	0.546	0.624	0.541	0.587	0.614
	$P$		0.016	0.006	0.038	0.020	0.039	0.026	0.018
MPS	$R^2$	0.614	0.631	0.805	0.609	0.780	0.582	0.774	1.000
	$P$	0.018	0.020	0.002	0.023	0.004	0.028	0.008	

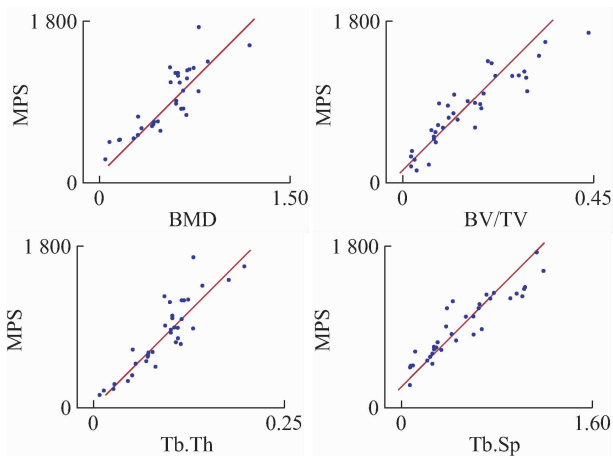


图2 螺钉 MPS 与 BMD 及骨显微结构参数的相关性

Fig.2 Correlation between the MPS, BMD, microstructure parameters

### 3 讨论

双能 X 线吸收仪骨密度仪扫描检测 BMD 仅是二维射线对三维结构投射的结果,该方法所检测的 BMD 仍是目前骨质疏松症诊断的主要依据<sup>[3,4,7]</sup>。但是,越来越多的研究揭示,骨质疏松症时骨的特性改变不仅是量上下降的结果,更是其微结构发生退变的结果<sup>[1-2]</sup>。发生骨质疏松时,椎弓根螺钉的稳定性要受到影响,虽然通过 BMD 在一定程度上可以判断螺钉是否松动,但仍有 30% ~ 40% 的松动无法通过 BMD 结果进行解释<sup>[8-9]</sup>。那么,是否可以通过观察骨的微结构找到椎弓根螺钉发生松动更全面的原因呢? 本研究正是带着这个假设而设计开展的。

椎弓根螺钉拔出力学实验多被认为是“破坏”性实验,即在大多数实验中,椎弓根螺钉经拔出后,标本就作抛弃处理。但是,尸体椎体标本无疑是脊柱内固定力学实验中不可或缺的珍贵实验材料,受社会法律、伦理及文化等限制,获取非常困难。为

此,本实验对拔出后的标本开展进一步的 micro-CT 分析,获取椎弓根螺钉所对应植入椎体的松质骨显微结构参数,希望从中得到更丰富的椎体骨质质量改变数据,以期了解随 BMD 逐渐下降,椎体骨质改变所导致的椎弓根螺钉稳定性下降的原因。

椎体内骨结构呈多态性不均匀分布,椎弓根部、椎体体部分别在螺钉的把持力中约占 2/3、1/3,说明椎弓根的骨质质量是决定椎弓根螺钉稳定性的关键因素<sup>[10]</sup>。然而本研究中采用椎体体部中央的松质骨而非椎弓根部作为标本,是考虑到骨质疏松后椎体体部的骨质与椎弓根部的骨质发生同步性的退变,即椎体体部骨质质量对椎弓根的骨质质量具有代表性。另外,椎弓根的结构复杂,取显微 CT 标本时,很有可能存在取材不均一,从而影响实验结果的准确性,故为提高取材方法的标准性,本研究采用了“沿头尾方向,垂直椎体上终板,以椎体体部的长、短径的交点为圆心取样”的统一方法,从而降低取样不均造成实验结果不准确的风险。

实验中,按 4 个 BMD 水平分别对椎体松质骨进行 micro-CT 扫描发现,随 BMD 正常水平向重度疏松梯度降低时,所对应的 BV/TV、Tb. Th 和 Tb. N 值也降低;相反,SMI、BS/BV 和 Tb. Sp 3 个指标随之有不同程度的上升,这一结果与文献<sup>[11-12]</sup>中报道的变化规律相一致;说明随骨质疏松逐渐加重,松质骨微结构参数发生了梯度性的退变,即骨小梁数目逐渐减少,厚度变薄,骨小梁间连接变少、间隙变大,小梁逐渐由板状向杆状转变(见图 3)。正是微结构发生退变,导致椎弓根螺钉的把持力依次下降。虽然标本仅取材于椎体中央的松质骨,但这些微观结构是椎体骨质包括椎弓根部骨质改变的体现,具有代表性。因此,松质骨的显微结构改变能够反映骨在质上发生的退变。

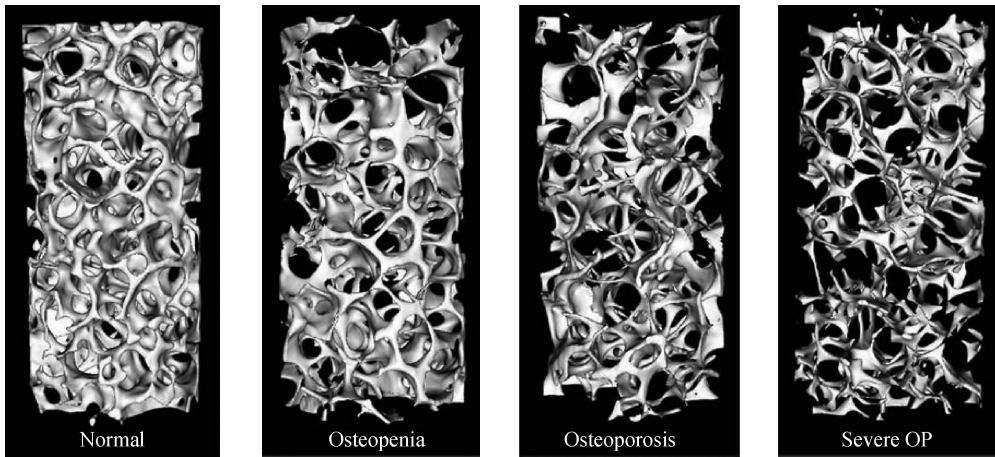


图3 典型不同 BMD 水平的椎体骨小梁 micro-CT 显微结构重建显像

Fig.3 Three-dimensional reconstructions of cancellous bone from micro-CT images of cylinder samples cored from vertebral bodies

本研究针对椎体 BMD、椎体松质骨微结构参数与椎弓根螺钉 MPS 进行相关分析,旨在发现能准确预判椎弓根螺钉稳定性的骨质指标,以期更好指导临床应用椎弓根螺钉,避免因螺钉松动而导致的手术失败后果。经相关分析发现,BMD、松质骨微结构参数之间存在广泛的显著相关性,反映了各个骨质评价指标的可靠性,说明发生骨质疏松时骨会发生各层面的复杂退变,要对骨质疏松正确评价,必须应用综合措施,才能全面、正确地认识骨质的改变情况。通过将螺钉 MPS 与反映骨质的指标进行相关分析,发现某些骨微结构参数比 BMD 与螺钉稳定性存在更强的相关性,说明应用这些指标去判断螺钉稳定性要比单纯用 BMD 更准确。例如,MPS 与 BV/TV、Tb. Th、Tb. Sp 均存在高度的相关性,说明这些参数所反映的骨质正是螺钉稳定性的决定因素。

需要指出的是,因实验中标本数量有限,不能开展多元回归分析;如果将这些相关性显著的指标筛选后联合起来,无疑更能提高对螺钉稳定性的判断力。本研究另一不足之处是骨标本 micro-CT 扫描所得参数是在假设钉道对椎体体部中央的松质无太大影响的前提下取得的,因为椎弓根螺钉的钉道相对椎体所占比例较小。

综上所述,本文的主要结论有:(1)骨质疏松症时,随 BMD 下降,骨质会发生微结构方面非常复杂的一系列退变;(2)螺钉 MPS 与部分骨显微结构参数高度相关。

#### 参考文献:

- [1] Perilli E, Briggs AM, Kantor S, *et al.* Failure strength of human vertebrae: Prediction using bone mineral density measured by DXA and bone volume by micro-CT [J]. *Bone*, 2012, 50(6): 1416-1425.
- [2] Djuric M, Zagorac S, Milovanovic P, *et al.* Enhanced trabecular micro-architecture of the femoral neck in hip osteoarthritis vs. healthy controls: A micro-computer tomography study in postmenopausal women [J]. *Int Orthop*, 2013, 37(1): 21-26.
- [3] 牛海军, 邵晓宁, 王立, 等. 脱钙过程中松质骨骨量、微结构和声学参数的相关性研究 [J]. *医用生物力学*, 2011, 26(6): 527-533.  
Niu HJ, Shao XN, Wang L, *et al.* Correlation study on bone density, microstructure and acoustic parameters of cancellous bone at different stages of decalcification [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(6): 527-533.
- [4] Sieber PR, Rommel FM, Theodoran CG, *et al.* The role of distal third radius dual energy X-ray absorptiometry (DXA) and central DXA in evaluating for osteopenia and osteoporosis in men receiving androgen deprivation therapy for prostate cancer [J]. *J Clin Densitom*, 2012, 15(3): 351-354.
- [5] Liu Z, Piao J, Pang L, *et al.* The diagnostic criteria for primary osteoporosis and the incidence of osteoporosis in China [J]. *J Bone Miner Metab*, 2002, 20(4): 181-189.
- [6] 李严兵, 王爱平, 彭田红, 等. 腰椎椎弓根通道不同外偏角方向变化规律的数字解剖学研究 [J]. *中国临床解剖学杂志*, 2007, 25(2): 113-117.
- [7] Mitra E, Rubin C, Gruber B, *et al.* Evaluation of trabecu-

lar mechanical and microstructural properties in human calcaneal bone of advanced age using mechanical testing, micro-CT, and DXA [J]. *J Biomech*, 2008, 41(2): 368-375.

- [8] Halvorson TL, Kelley LA, Thomas KA, *et al.* Effects of bone mineral density on pedicle screw fixation [J]. *Spine*, 1994, 19(21): 2415-2420.
- [9] Gao MX, Lei W, Wu ZX, *et al.* Biomechanical evaluation of fixation strength of conventional and expansive pedicle screws with or without calcium based cement augmentation [J]. *Clin Biomech*, 2011, 26(3): 238-244.
- [10] Hriano T, Hasegawa K, Takahashi HE, *et al.* Structural

characteristics of the pedicle and its role in screw stability [J]. *Spine*, 1997, 22(21): 2504-2510.

- [11] 于志锋, 汤亭亭. 双膦酸盐药物长期应用对显微损伤和骨力学性能的影响[J]. *医用生物力学*, 2010, 25(6): 485-488.
- Yu ZF, Tang TT. Effect of long term use of bisphosphates on microdamage and mechanical properties of bone [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(6): 484-487.
- [12] Zhang ZM, Li ZC, Jiang LS, *et al.* Micro-CT and mechanical evaluation of subchondral trabecular bone structure between postmenopausal women with osteoarthritis and osteoporosis [J]. *Osteoporos Int*, 2010, 21(8): 1383-1390.

## 《医用生物力学》杂志征稿、征订启事

《医用生物力学》杂志由中华人民共和国教育部主管、上海交通大学主办,是国内唯一一本公开发行,积极反映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、生、理、工各学科相互了解和合作为目的学术性刊物。报道内容主要包括生物力学领域中有关力学生物学、器官-组织生物力学、细胞-亚细胞-分子生物力学、感觉系统生物力学、骨骼肌肉系统生物力学、航空航天生物力学、颌面口腔生物力学、呼吸系统生物力学、康复工程生物力学、心血管系统生物力学、血液流变学、医用材料生物力学、运动医学生物力学等的研究论文。本刊为中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊);美国《化学文摘》、波兰《哥白尼索引》、俄罗斯《文摘杂志》、荷兰《文摘与引文数据库》来源期刊;2012年入选北京大学图书馆《中文核心期刊要目总览》(2011年版)。

本刊为双月刊,每双月25日出版,16开本,96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15.00元,全年90.00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

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