

## 瑜伽对慢性腰背痛患者康复的生物力学机制分析

祁俊菊<sup>1,2</sup>, 王仙园<sup>2</sup>, 杜秋华<sup>1</sup>

1. 重庆医药高等专科学校护理学院, 重庆 401331; 2. 第三军医大学护理学院, 重庆 401331

**【摘要】**为更好地理解瑜伽对慢性腰背痛患者康复的作用机制,本研究建立人体重力、肌群力和呼吸腹压共同作用下的瑜伽生物力学模型,定量研究瑜伽运动过程中脊柱荷载及维持脊柱整体稳定的各核心肌群应力。进而分析不同瑜伽体式的人体受力特点,从脊柱整体稳定性角度研究瑜伽运动与慢性腰背痛患者康复的内在联系,为慢性腰背痛患者利用瑜伽运动康复提供合理的建议和科学依据。

**【关键词】**瑜伽;生物力学;慢性腰背疼痛;脊柱;康复

**【中图分类号】**R493

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2017)07-0748-05

## Biomechanical mechanism of yoga on the rehabilitation of patients with chronic low back pain

QI Junju<sup>1,2</sup>, WANG Xianyuan<sup>2</sup>, DU Qiuhua<sup>1</sup>

1. School of Nursing, Chongqing Medical and Pharmaceutical College, Chongqing 401331, China; 2. School of Nursing, Third Military Medical University, Chongqing 401331, China

**Abstract:** To understand the mechanism of yoga on the rehabilitation of patients with chronic low back pain, we establish a yoga biomechanical model under the action of the gravity of the human body, muscle contraction and abdomen pressure, quantitatively analyzing the spinal load in the process of yoga and maintaining the overall stable core muscle stress in the spine. The human stress characteristics of different yoga postures are analyzed, and the relationship between yoga and the rehabilitation of patients with chronic low back pain are investigated based on the spine overall stability, providing reasonable suggestions and scientific basis for yoga in the rehabilitation of patients with chronic low back pain.

**Keywords:** yoga; biomechanics; chronic low back pain; spine; rehabilitation

### 前言

慢性腰背痛是一种人类脊柱最常见的疾患,脊椎骨、韧带、椎间盘、脊髓、背阔肌、骶棘肌等背、腰、腹肌肉群系统构成了人体脊柱运动的内源性和外源性稳定系统,承载身体重力、腹压、躯干自身运动荷载、外在附加荷载等。许多学者对脊柱运动与腰背痛的关系进行了研究<sup>[1-3]</sup>。脊柱一旦失稳,除了导致脊柱本身及相关结构组织的病变以外,还可通过血管、神经的反射作用使相应的脊髓节段支配的内脏产生功能上的异常,不能维持整体活动的稳定性<sup>[4]</sup>。

Posadzki等<sup>[5]</sup>对瑜伽在慢性腰背痛患者中的应用

研究进行系统分析,表明其在减轻腰背痛方面比常规锻炼显著。Patricia等<sup>[6]</sup>对瑜伽在妊娠相关腰背痛中的应用进行研究,表明其在减轻妊娠相关腰背痛方面亦有显著效果。Michael等<sup>[7]</sup>进行了瑜伽、气功在慢性腰背痛患者康复训练效果的对比分析。Keo-saian等<sup>[8]</sup>通过研究证实瑜伽是一种多维治疗慢性腰背痛的有效手段。Goode等<sup>[9]</sup>绘制了慢性腰背痛瑜伽疗效证据图。崇玉萍等<sup>[10]</sup>研究Hatha瑜伽对非特异性下腰痛康复的影响,发现6周瑜伽锻炼后研究对象功能障碍调查评分、疼痛程度视觉模拟量尺评分显著下降,腰背肌耐力和腰椎关节活动度显著上升。陈丽霞<sup>[11]</sup>对70例中老年慢性腰痛病人的瑜伽防治效应进行研究,发现9个月瑜伽训练完成后,研究对象骶棘肌肌电图波幅提高、时程降低,慢性腰痛治愈效率达82.86%。但瑜伽对于慢性腰背痛患者的机理研究并不多,本文探讨分析瑜伽对慢性腰背痛患者的生物力学机制,为瑜伽在临床康复中的应用寻找理论依据。

**【收稿日期】**2017-02-14

**【基金项目】**重庆市教育教学改革重点项目(152062);重庆市社会科学规划项目(2014BS118)

**【作者简介】**祁俊菊,女,博士,副教授,研究方向:老年护理、护理教育, E-mail: qjssmu@126.com

## 1 瑜伽运动人体生物力学模型的建立

瑜伽的运动功能与其生物力学原理分不开,通过生物力学分析可以定量研究瑜伽运动过程中脊柱荷载及维持脊柱整体稳定的各肌群应力,理解瑜伽运动的人体力学原理,更有效地利用骨骼和肌群的特点,达到瑜伽在临床康复中的科学应用,以及更加积极主动有效地防治慢性腰背痛的目的。因此,本研究根据生物力学原理建立瑜伽人体生物力学模型。

正常人体的正中中线通过脊柱,左右同名肌对称分布且相对成组,众多肌肉聚集成互相配合的整体,如图1所示。肌性前壁肌(如腹直肌等)产生合力 $F_{m1}$ ,肌性后壁肌(如骶棘肌等)产生合力 $F_{m2}$ ,在左右同名肌对称用力时,两种合力均落在正中矢状面上。以腰骶关节( $L_5/S_1$ )为代表的椎间盘受力中心为坐标原点O,过O点的水平面以上的人体上半身重心均落于正中矢状面上。胸腹腔相对正中矢状面左右对称,胸腹腔内压的合力亦落在正中矢状面上。据上述 $L_5/S_1$ 关节所受应力特点:人体从直立到背屈过程中, $L_5/S_1$ 受的压应力方向角与背屈角几乎相等。可假设压应力方向与躯干轴线近似共线,故将压应力方向定为Y轴,过 $L_5/S_1$ 中心,与Y轴垂直的直线为X轴。文中出现的数据均根据全身CT和核磁共振成像(MRI)的比例,临床X线、CT、MRI成像的测算和有关文献<sup>[12-15]</sup>的参考而设定。

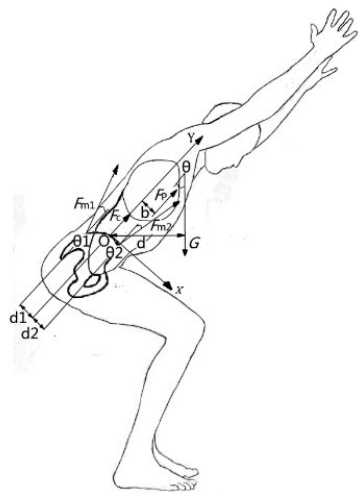


图1 瑜伽体位人体力学分析

Fig.1 Human body mechanics analysis of yoga posture

基于力学平衡原理,可得在人体重力、肌群力和腹压共同作用下瑜伽各体式的前后壁肌力和 $L_5/S_1$ 应力公式为:

$$F_{m1} = \frac{G(d_2 \sin \theta \cos \theta_2 + d \sin \theta_2) + F_p b \sin \theta_1}{d_1 \sin \theta_2 \cos \theta_1 - d_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2} \quad (1)$$

$$F_{m2} = \frac{G(d_1 \sin \theta \cos \theta_1 + d \sin \theta_1) + F_p b \sin \theta_1}{d_1 \sin \theta_2 \cos \theta_1 - d_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2} \quad (2)$$

$$F_c = G \cos \theta - F_p - \frac{(Gd + F_p b) \sin(\theta_1 + \theta_2) + G(d_1 + d_2) \sin \theta \cos \theta_1 \cos \theta_2}{d_1 \sin \theta_2 \cos \theta_1 - d_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2} \quad (3)$$

式中, $F_{m1}$ 是肌性前壁肌(如腹直肌等)合力; $F_{m2}$ 是肌性后壁肌(如骶棘肌等)合力; $F_p$ 是胸腹腔内压合力; $F_c$ 是椎间盘压力; $\theta_1$ 是前壁肌合力与躯干轴线夹角; $\theta_2$ 是后壁肌合力与躯干轴线夹角; $\theta$ 是重力与躯干轴线夹角; $G$ 是上半身重力; $d_1$ 是前壁肌力距离椎间盘受力中心距离; $d_2$ 是后壁肌力距离椎间盘受力中心距离; $b$ 是胸腹腔内压力距离椎间盘受力中心距离; $d$ 是重力作用线距离椎间盘受力中心距离。

有些瑜伽体位,只需要前壁肌力或者后壁肌力就可使人体平衡,根据静力平衡原理,壁肌力和 $L_5/S_1$ 应力公式还可以进一步简化。在瑜伽山式放松站立时,只需后壁肌力即可保持人体平衡,此时后壁肌力和 $L_5/S_1$ 应力可简化为:

$$F_{m1} = 0 \quad (4)$$

$$F_{m2} = -\frac{Gd + F_p b}{d_2} \quad (5)$$

$$F_c = G - F_p + G\left(\frac{d}{d_2}\right) + F_p\left(\frac{b}{d_2}\right) \quad (6)$$

在瑜伽站立后仰式时,只需前壁肌力即可保持人体平衡,此时前壁肌力和 $L_5/S_1$ 应力可简化为:

$$F_{m1} = \frac{Gd + F_p b}{d_1} \quad (7)$$

$$F_{m2} = 0 \quad (8)$$

$$F_c = G - F_p - G\left(\frac{d}{d_1}\right) - F_p\left(\frac{b}{d_1}\right) \quad (9)$$

为计算方便,其他各种瑜伽体位可根据实际情况进行类似简化,限于篇幅就不一一列举。

## 2 瑜伽呼吸和慢性腰背痛康复

瑜伽体式练习是配合有意识的呼吸同时进行的,一般来说,吸气配合伸展动作,呼气动作收回或弯曲,这是瑜伽练习与其他运动方式不同之处。呼吸时,腹横肌、腹内外斜肌收缩产生的合力在腹腔内转变为腹内压,从纯理论角度出发,单纯向上的胸腹腔内压亦能使躯体维持平衡<sup>[12]</sup>。下面以瑜伽常见的手臂向上的山式体式为例,进行慢性腰背痛康复的瑜伽呼吸生物力学分析。选取 $G=450\text{ N}$ , $\theta_1=15^\circ$ , $\theta_2=10^\circ$ , $d_1=0.10\text{ m}$ , $b=0.04\text{ m}$ , $d=0.02\text{ m}$ ,腹内压最大值可取 $90\text{ mmHg}$ <sup>[16]</sup>, $F_p$ 控制在 $0\sim 300\text{ N}$ 。 $d_2$ 值在各文献中取值有较大差异,综合所查文献,文中 $d_2$ 控制在

0.045~0.060 m。代入式(1)~(3),可得肌性前壁肌力 $F_{m1}$ 、肌性后壁肌力 $F_{m2}$ 、椎间盘压力 $F_c$ 随着腹内压 $F_p$ 和肌性后壁肌距离椎间盘受力中心距离 $d_2$ 的关系三维演化曲面图,如图2~4所示。

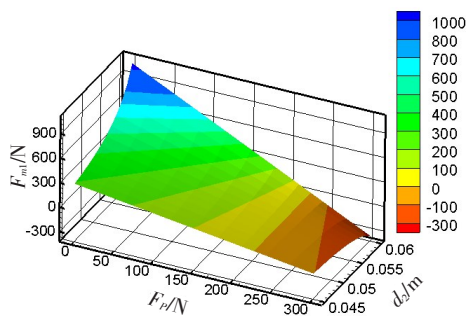


图2  $F_{m1}$ 随 $F_p$ 、 $d_2$ 变化演化图

Fig.2 Diagram of  $F_{m1}$  varying with  $F_p$  and  $d_2$

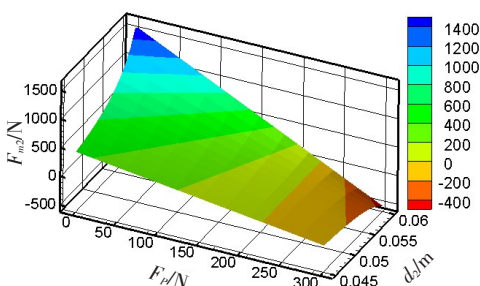


图3  $F_{m2}$ 随 $F_p$ 、 $d_2$ 变化演化图

Fig.3 Diagram of  $F_{m2}$  varying with  $F_p$  and  $d_2$

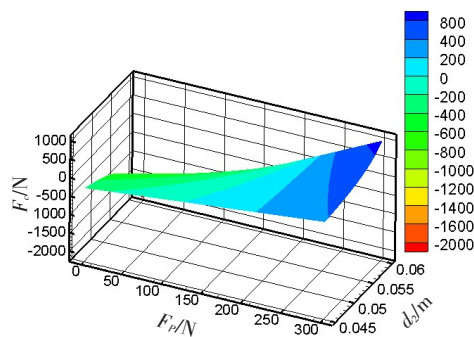


图4  $F_c$ 随 $F_p$ 、 $d_2$ 变化演化图

Fig.4 Diagram of  $F_c$  varying with  $F_p$  and  $d_2$

在做手臂向上的山式瑜伽体式时,肌性前、后壁肌作离心收缩, $F_{m1}$ 、 $F_{m2}$ 方向向上,可起到肌肉软支撑作用。随着腹内压 $F_p$ 的增加, $F_{m1}$ 、 $F_{m2}$ 逐渐减小,当腹内压增加到240 N时, $F_{m1}$ 、 $F_{m2}$ 由正值转为负值,为维持躯体平衡, $F_{m1}$ 、 $F_{m2}$ 方向开始向下,此时随着腹内压增加, $F_{m1}$ 、 $F_{m2}$ 转为逐渐增加。而无论 $F_{m1}$ 、 $F_{m2}$ 方向如何,随着 $d_2$ 增加, $F_{m1}$ 、 $F_{m2}$ 均呈增大趋势。在腹内压较小时,椎间盘压力 $F_c$ 由于 $F_{m1}$ 、 $F_{m2}$ 的软支撑作用为负值,负压可使椎间盘向椎体中心收缩,有利于预防或

消除椎间盘突出,随着腹内压的增加椎间盘负压 $F_c$ 逐渐减小,当腹内压增加到150 N时,椎间盘负压转为正压,此时椎间盘压力随着腹内压增加逐渐增加。类似于 $F_{m1}$ 、 $F_{m2}$ ,无论 $F_c$ 方向如何,随着 $d_2$ 增加, $F_c$ 均呈增大趋势。当 $F_p=0$  N和 $d_2$ 在0.049~0.052 m时,椎间盘负压 $F_c$ 为442~616 N;当 $F_p=30$  N和 $d_2$ 在0.050~0.053 m时,椎间盘负压 $F_c$ 为422~604 N;当 $F_p=60$  N和 $d_2$ 在0.052~0.054 m时,椎间盘负压 $F_c$ 为392~581 N;当 $F_p=90$  N和 $d_2$ 在0.055~0.056 m时,椎间盘负压 $F_c$ 为435~544 N;当 $F_p=120$  N和 $d_2$ 在0.057~0.058 m时,椎间盘负压 $F_c$ 为485~641 N,均在400~600 N有效牵引力范围内<sup>[17]</sup>。

瑜伽呼吸在促进脊柱椎体组织力量、柔韧性和平衡性训练的同时,借助呼吸还可以使所伸展组织深处吸纳更多氧气和血液营养,进一步强化练习效果。瑜伽完全呼吸法是胸式呼吸与腹式呼吸的结合,能最大限度地扩充肺部,使大多数肺小叶参与呼吸氧合过程,通过横膈膜带动腹部自然起伏,呼吸均匀、缓慢且深长,虽然和平静呼吸、浅快呼吸通气量一样,都为6 000 mL/min,但肺泡通气量却达到5 100 mL/min,远远高于前两者,可以向身体各组织提供更丰富的氧气,增加血液含氧量、净化血液(图5)<sup>[18]</sup>。

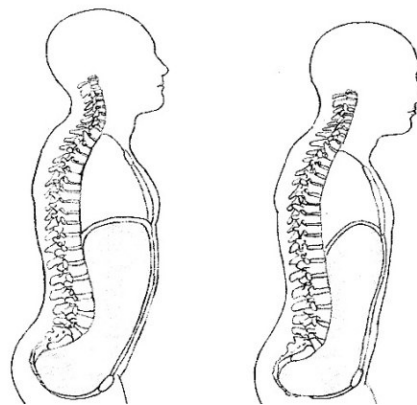


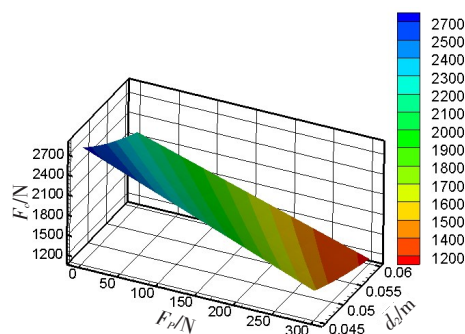
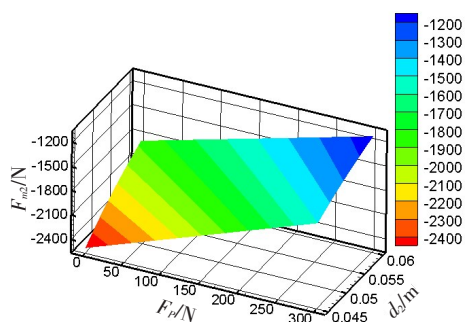
图5 完全呼吸时脊柱和腹腔的变化

Fig.5 Changes of spine and abdomen during full Yoga breath

### 3 瑜伽体位练习和慢性腰背痛康复

瑜伽属于主动运动,练习过程中对脊柱各方向进行有效牵拉。如纵向伸展式体位:腰椎前屈、后伸、旋转、侧屈及环转以使屈肌群、伸肌群、侧屈肌群得到不同方向的伸展,躯干上提同时减小脊柱一级弯曲和二级弯曲,增加脊柱整体长度。人体前屈45°时,肌性后壁肌力 $F_{m2}$ 椎间盘压力 $F_c$ 随着腹内压 $F_p$ 和肌性后壁肌距离椎间盘受力中心距离 $d_2$ 的关系三维演化曲面图(图6和图7)。



图6  $F_{m2}$ 随 $F_p$ 、 $d_2$ 变化演化图Fig.6 Diagram of  $F_{m2}$  varying with  $F_p$  and  $d_2$ 图7  $F_c$ 随 $F_p$ 、 $d_2$ 变化演化图Fig.7 Diagram of  $F_c$  varying with  $F_p$  and  $d_2$ 

纵向前屈伸展时,肌性后壁肌力 $F_{m2}$ 、椎间盘压力 $F_c$ 均较直立时有很大提高,大概是直立状态的2~3倍,可带动背伸肌群和骶棘肌,加强肌力训练,但同时易造成背伸肌及腰部韧带的牵张性劳损<sup>[15]</sup>。为避免这种可能伤害,上山式、骆驼式、狮身人面式、半蝗虫式、战士式及眼镜蛇式以及双脚支撑式等牵拉后弯伸展式体位,是顺应重力的后弯,使多裂肌放松,同时训练腹肌和下肢肌,使胸、腹和骨盆组织得到深层力量的训练,增强上半身组织的力量。因此,瑜伽能锻炼腰背伸肌群(含多裂肌、骶棘肌)和腹肌力量,通过椎体活动刺激椎间盘、关节囊等,旋转方向上的牵伸促使脊柱旋转和椎体滑动,多裂肌收缩-还原-放松,得到有效训练,符合肌力训练及肌肉牵伸的原理<sup>[19]</sup>。

通过瑜伽锻炼可有效增加肌性前壁肌力 $F_{m1}$ 、肌性后壁肌力 $F_{m2}$ ,可有效地为脊柱提供软支撑,减少椎间盘内压,维持脊柱整体稳定性,基于式(1)~(3)可得椎间盘内压 $F_c$ 和 $F_{m1}$ 、 $F_{m2}$ 的关系为:

$$F_c = G \sin \theta - F_p - F_{m1} \cos \theta_1 - F_{m2} \cos \theta_2 \quad (10)$$

式中,肌性前后壁肌作离心收缩, $F_{m1}$ 、 $F_{m2}$ 方向向上,随着 $F_{m1}$ 、 $F_{m2}$ 的增加,椎间盘内压 $F_c$ 逐渐减少,柔韧各脊柱节段,减轻椎体间的压力并促进循环,且纠正轻度错位变形的腰椎间盘和椎间孔,椎间隙略增宽,椎

间盘内压小,还纳部分椎间盘,减轻对神经根的压迫。肢体的伸展牵拉脊柱椎体,对其腰肌劳损进行力量性训练,维持椎体稳定与平衡,使脊柱与椎体的活动更灵活。

## 4 结论

一方面,瑜伽可以有效锻炼脊柱柔韧度和深层核心肌群—多裂肌和腹横肌,促使肌性前、后壁肌为人体提供软支撑,降低脊柱负荷,减轻或避免常见的引起慢性腰背痛的腰椎间盘突出等病变,对减轻慢性腰背痛有较好的效果。另一方面,瑜伽属于有氧运动,体式练习强调与呼吸配合,在促进脊柱椎体组织力量、柔韧性及平衡性训练的同时,借助呼吸,使所伸展组织深处吸纳更多氧气和血液营养,进一步强化练习效果,为患者脊柱平衡提供强大的内源性和外源性稳定保障。

基于人体生物力学可定量分析在考虑呼吸作用、重力作用等条件下瑜伽各体位练习时的人体脊柱、肌群应力实时动态演化特征,为正确认识瑜伽运动对于慢性腰背痛患者康复提供理论依据,还可以有效制定适合不同年龄阶段特点的瑜伽运动方案,有助于患者有效的自我管理。

## 【参考文献】

- [1] 项斌,都承斐,赵美雅,等.不同牵拉方式对腰椎的生物力学影响[J].医用生物力学,2014,29(5):399-404.  
XIANG B, DU C F, ZHAO M Y, et al. Biomechanical effects of different traction modes on lumbar spine[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2014, 29(5): 399-404.
- [2] 原芳,薛清华,刘伟强.有限元法在脊柱生物力学应用中的新进展[J].医用生物力学,2013,28(5):585-590.  
YUAN F, XUE Q H, LIU W Q. Recent advances about finite element applications in spine biomechanics[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2013, 28(5): 585-590.
- [3] 吴星,顾冬云,陈金灵,等.搬运护理时脊柱承载风险特征及影响因素[J].医用生物力学,2013,28(4):372-378.  
WU X, GU D Y, CHEN J L, et al. Injury risks and affecting factors of spinal loads for caregiver's manual patient handling tasks[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2013, 28(4): 372-378.
- [4] 邹培.脊柱稳定的生物力学及整脊学思考[J].世界中医骨科杂志,2010,11(2):61-62.  
ZOU P. Biomechanics and orthopaedicspinal consideration about spine stability[J]. World Journal of Traditional Chinese Orthoprdics, 2010, 11(2): 61-62.
- [5] POSADZKI P, ERNST E. Yoga for low back pain: a systematic review of randomized clinical trials[J]. Clin Rheumatol, 2011, 30(9): 1257-1262.
- [6] PATRICIA A K, JENA P, NANCY J, et al. Physical activity and yoga-based approaches for pregnancy-related low back and pelvic pain[J]. J Obstet Gynecol Neonatal Nurs, 2017, 46(3): 334-346.
- [7] MICHAEL T, JUDITH K, DOROTHEA D, et al. Qigong or yoga versus no intervention in older adults with chronic low back pain—a

- randomized controlled trial[J]. J Pain, 2016, 17(7): 796-805.
- [8] KEOSAIAN J E, LEMASTER C M, DRESNER D, et al. "We're all in this together": a qualitative study of predominantly low income minority participants in a yoga trial for chronic low back pain[J]. Complement Ther Med, 2016, 24: 34-39.
- [9] GOODE A P, COEYTAUX R R, MCDUFFIE J, et al. An evidence map of yoga for low back pain[J]. Complement Ther Med, 2016, 25: 170-177.
- [10] 崇玉萍, 崇玉珍, 薛才, 等. Hatha瑜伽对非特异性下腰痛康复的影响[J]. 中国体育科技, 2011, 47(3): 99-103.
- CHONG Y P, CHONG Y Z, XUE C, et al. The effect of yoga on nonspecific lumbar pain recovery [J]. China Sport Science and Technology, 2011, 47(3): 99-103.
- [11] 陈丽霞. 健身瑜伽对中老年女性慢性腰痛的防治研究[J]. 北京体育大学学报, 2006, 29(1): 79.
- CHEN L X. The research on the prevention and treatment of chronic low back pain in middle-aged women with yoga[J]. Journal of Beijing Sport University, 2006, 29(1): 79.
- [12] 魏晓宁, 王艳, 裴飞. 腰椎间盘结构、盘内压力及不同载荷的影响: 生物力学研究进展[J]. 中国组织工程研究, 2015, 19(20): 3242-3247.
- WEI X N, WANG Y, PEI F. Effects of intervertebral disc structure, disc pressure and different loading [J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering, 2015, 19(20): 3242-3247.
- [13] 罗炯. 静载荷下由直立到背屈作业人体腰骶关节应力特征研究[J]. 天津体育学院学报, 2012, 27(4): 333-337.
- LUO J. Study on the stress characteristics of lumbosacral joint from vertical style to dorsiflexion under the static load[J]. Journal of Tianjin University of Sport, 2012, 27(4): 333-337.
- [14] 李旭, 郭跃峰. 慢性腰痛患者躯干旋转肌群肌力与腰部稳定性的关系[J]. 中国康复理论与实践, 2010, 16(11): 1013-1014.
- LI X, GUO X F. Relationship between trunk rotatores muscles and waist stability [J]. Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice, 2010, 16(11): 1013-1014.
- [15] 周游. 影响腰椎间盘内压两大因素的生物力学分析[J]. 中国骨伤, 1998, 11(1): 42-45.
- ZHOU Y. Biomechanical analysis on two factors that affect the lumbar intervertebral disc pressure[J]. China Journal of Orthopaedics and Traumatology, 1998, 11(1): 42-45.
- [16] DAMS P R, STUBBS D A. Force limits in manual work[J]. Appl Ergon, 1988, 9: 33-38.
- [17] SILVA M J, WANG C, KEAVENY T M, et al. Direct and computed tomography thickness measurement of the human, lumbar vertebral shell and endplate[J]. Bone, 1994, 15(4): 409-414.
- [18] SHERMAN K, WELLMAN R, CHERKIN D. Mediators of the effects of yoga and stretching on chronic low back pain (CLBP) outcomes: results from the YES RCT[J]. BMC Complement Altern Med, 2012, 12(S1): 43.
- [19] 冯能, 李跃红, 缪芸, 等. 慢性腰痛患者站立位躯干屈伸运动时腰背肌的功能变化研究[J]. 中国康复医学杂志, 2012, 27(7): 600-602.
- FENG N, LI Y H, LIAO Y, et al. Investigation on functional changes of low back muscles low back muscles trunk flexion and extension in a standing position[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2012, 27(7): 600-602.

(编辑: 陈丽霞)

(上接725页)

- [12] 张矛, 金海国, 卜明伟, 等. 脑胶质瘤术后VMAT与IMRT放疗技术间比较[J]. 中国医学物理学杂志, 2011, 28(6): 2959-2963.
- ZHANG M, JIN H G, BU M W, et al. A comparison of volumetric modulated arc therapy and intensity-modulated radiotherapy for postoperative glioma[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2011, 28(6): 2959-2963.
- [13] 殷蔚伯, 谷铣之, 刘泰福, 等. 肿瘤放射治疗学: 中枢神经系统肿瘤. [M]. 第3版. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2002: 1018.
- YIN W B, GU X Z, LIU T F, et al. Oncology radiotherapy: central nervous system neoplasms [M]. 3rd ed. Beijing: Peking Union Medical College Press, 2002: 1018.
- [14] OMURO A, DEANGELIS L M. Glioblastoma and other malignant gliomas: a clinical review[J]. JAMA, 2013, 310(17): 1842.
- [15] STUPP R, HEGI M E, MASON W P, et al. Effects of radiotherapy with concomitant and adjuvant temozolomide versus radiotherapy alone on survival in glioblastoma in a randomised phase III study: 5-year analysis of the EORTC-NCIC trial[J]. Lancet Oncol, 2009, 10(5): 459-466.
- [16] OTTO K. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc[J]. Med Phys, 2008, 35(1): 310-317.
- [17] RAO M, YANG W, CHEN F, et al. Comparison of Elekta VMAT with helical tomotherapy and fixed field IMRT: plan quality, delivery efficiency and accuracy[J]. Med Phys, 2010, 37(3): 1350-1359.
- [18] TANG G, EARL M A, LUAN S, et al. Comparing radiation treatments using intensity-modulated beams, multiple arcs, and single arcs[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2010, 76(5): 1554-1562.
- [19] STIEBER V W, TATTER S B, LOVATO J, et al. A phase I dose escalating study of intensity modulated radiation therapy (IMRT) for the treatment of glioblastoma multiforme (GBM) [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2004, 54(2): 206-207.
- [20] LEE Y K, BROOKS C J, BEDFORD J L, et al. Development and evaluation of multiple isocentric volumetric modulated arc therapy technique for craniospinal axis radiotherapy planning[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2012, 82(2): 1006-1012.
- [21] CATTANEO G M, RENI M, RIZZO G, et al. Target delineation in post-operative radiotherapy of brain gliomas: interobserver variability and impact of image registration of MR (pre-operative) images on treatment planning CT scans[J]. Radiother Oncol, 2005, 75(2): 217-223.
- [22] 廖小方, 胡伟, 余文亮, 等. 利用CT-MRI图像融合勾画脑胶质瘤术后的临床靶体积[J]. 肿瘤学杂志, 2010, 16(8): 656-658.
- LIAO X F, HU W, YU W L, et al. Using CT-MRI fusion image to delineate the clinical target volume in patients with gliomas postoperation[J]. Journal of Oncology, 2010, 16(8): 656-658.
- [23] 杜霄勤, 安菊生, 马攀, 等. ICRU83号报告推荐方式评估宫颈癌术后辅助IMRT与传统放疗方式的差异及可行性[J]. 癌症进展, 2015, 13(4): 419-424.
- DU X M, AN J S, MA P, et al. Difference and feasibility of intensity-modulated radiotherapy and conventional 2D radiotherapy for postoperative cervical cancer evaluated with ICRU 83 report method [J]. Oncology Progress, 2015, 13(4): 419-424.

(编辑: 黄开颜)