

文章编号:1004-7220(2017)03-0293-06

· 综 述 ·

有限元分析在腰椎手法治疗中的生物力学研究进展

王志鹏¹, 张晓刚², 赵文韬¹, 赵希云¹, 仝 尊¹

(1. 甘肃中医药大学 中医临床学院, 兰州 730000; 2. 甘肃中医药大学附属医院 脊柱外科, 兰州 730020)

摘要: 中医腰椎手法在腰痛等慢性损伤性腰椎病的疼痛治疗中有明显的临床优势,但其基础研究不足是限制手法进步的重要因素。利用有限元技术能够很好地模拟各类腰椎手法的力学状况,分析其作用机制,验证假说,规范手法操作,定量、定性和优化治疗方案,为手法治疗的基础研究提供有效的研究方法。通过回顾近年腰椎手法治疗的有限元研究,探讨不同腰椎手法对椎间盘、附属结构、脊柱负荷以及椎体力学稳定性的影响,结果发现目前关于腰椎手法的有限元研究有待于对模拟方法进行标准化和精确化,同时可进一步推广有限元的研究思路,更好地指导中医腰椎手法的临床运用。

关键词: 有限元分析; 腰椎推拿; 中医; 生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2017.03.015

Biomechanical research progress on finite element analysis in the treatment of spinal manipulation

WANG Zhi-peng¹, ZHANG Xiao-gang², ZHAO Wen-tao¹, ZHAO Xi-yun¹, TONG Zun¹

(1. *Clinical College of Traditional Chinese Medicine, Gansu University of Traditional Chinese Medicine, Lanzhou 730000, China*; 2. *Department of Spinal Surgery, the Affiliated Hospital of Gansu University of Traditional Chinese Medicine, Lanzhou 730020, China*)

Abstract: The spinal manipulation in traditional Chinese medicine (TCM) has a prominent clinical advantage in the treatment of chronic lumbar pain, such as low back pain, but the insufficient basic research on manipulation is a serious obstacle to its development. Using finite element analysis (FEA) can preferably simulate the mechanics under various kinds of spinal manipulation, analyze its action mechanism, test the hypothesis, standardize the operating practices, make quantitative, qualitative and optimal treatment plans, so as to provide an effective method for the basic research on manipulation therapy. This paper reviews the FEA studies of spinal manipulation in recent years, discusses the influence of different spinal manipulation on intervertebral disc, lumbar accessory structures, spinal loads and mechanical stability of the vertebral body. The results show that current FEA studies on spinal manipulation need to make the simulation method standardized and precise. Meanwhile, the research ideas of finite element method should be developed to guide the clinical application of spinal manipulation.

Key words: Finite element analysis; Spinal manipulation; Traditional Chinese medicine (TCM); Biomechanics

收稿日期:2016-08-19; 修回日期:2016-10-31

基金项目:国家自然科学基金项目(81560780)。

通信作者:张晓刚,主任医师,博士研究生导师, E-mail: zxg0525@163.com。

脊柱手法在腰痛等慢性损伤性腰椎病的疼痛治疗中有着突出的临床优势^[1]。尽管脊柱手法被证实某些人、某些条件下是合理的治疗选择^[2],但其达到治疗效果的作用机制尚不清楚,故手法治疗的安全性、规范性以及临床量化和评价标准的判定指标常被质疑。近年来,应用有限元分析方法研究中医腰椎手法治疗腰椎病的生物力学问题逐渐被认可。有限元分析通过数字形式将人体骨骼如脊柱结构、材料性能、载荷边界条件、内固定器械等加以概括。计算机有限元模型可用来改变任何参数的性质或形状,在持续性、重复性研究中应用,反映出局部以及内部的作用机制反应,可对脊柱损伤、退变、创伤等病理情况进行模拟分析,提供较为理想的数据分析^[3]。这一科学的研究方法在脊柱生物力学研究方面的应用有着其独特的优越性,可以提供全域性信息,能够解决许多用传统力学分析的数学工具无法解答的骨科学问题^[4]。因此,本文通过探讨不同腰椎手法对椎间盘、附属结构、脊柱载荷以及椎体生物力学稳定性影响的力学问题,回顾有限元分析在腰椎手法治疗中的生物力学研究进展。

1 腰椎有限元概述

有限元法是一种有效的离散化数值计算方法,已成为骨科生物力学研究有效的方法和手段之一^[5]。其基本原理是将自由连续体分割成有限个小单元组成的集合体,此过程称为有限元模型的离散化。根据其几何材料特性及受力条件而采用不同的单元种类,推导出每一个小单元的作用方程,组合整个自由连续体的单元并构成系统方程组,最后将系统方程组求解^[6]。1972年,Brekelmans和Rybycki首次将有限元法引入骨生物力学领域。自Lin等^[7]1978年在实验数据和有限元模型变形的推算之间减低到最低误差得到椎间盘9个弹性模量,构建了第1个真正椎间盘体的腰椎有限元模型。之后Simon等^[8]和Spiker等^[9]研究者建立了复杂三维有限元模型,在原始数据源获取的可靠性方面取得较大突破;1991年,Natali等^[10]建立了椎间盘为超弹性材料的非线性腰椎模型,随后Rao等^[11]建立了包含6种材料的椎体与椎间盘模型,同时提出弹性模

量和泊松比在腰椎生物力学效应中起重要作用。1994年,Shirazi-Adi^[12]通过尸体标本切片得到腰椎几何模型,在此基础上发展建立了L2~3椎体与椎间盘的三维有限元模型,提高了模型的几何相似性,在腰椎有限元模型研究中具有重要的里程碑意义。2001年,Zander等^[13]证实,在肌肉作用力加入有限元模型前后,椎间盘的应力分布差异显著,故对有限元模型的完整性提出挑战。之后,研究者开始构建肌肉的有限元模型^[14]。在国内,2003年,叶淦湖等^[15]应用有限元技术构建了退变的L4~5模型,并对其开展了简单的手法模拟研究。随后苏晋等^[16]引入接触理论,建立了整个腰椎的有限元接触模型,提高了有限元模型的真实性和可靠性。秦计生等^[17]采用医学图像处理软件和逆向工程软件建立L1~S1椎骨和椎间盘三维模型,再导入有限元软件中划分网格,附加腰椎相关韧带,构建腰椎加骶椎有限元模型,同时模拟4种载荷下腰椎的生物力学反应,为模拟腰椎手法模型的建立奠定基础。可以看出,近年来国内外有限元研究均致力于提升模型原始数据源的可靠性,提高材料相似性、几何相似性、边界约束相似性、载荷相似性等方面,并取得长足的进步,但模拟中医手法的有限元研究起步较晚,在载荷加载、边界约束条件等相似性方面存在不足,对有限元分析的准确性和有效性提出挑战。

2 腰椎手法的有限元分析研究

2.1 后伸类手法

腰椎后伸类手法是一种快速、有效的治疗方法,由于其操作简单,在临床实践中得到广泛应用。操作时患者俯卧位,术者一手前臂托住受试者单膝(或双膝)的上部,并向后上方抬起,另一手用力按住腰部,当腰椎后伸至最大限度时,双手协同用力,作相反方向扳动。临床证实,腰椎经后伸位的腰椎手法按摩可以恢复椎间盘突出患者的腰椎生理曲度,也达到了释放神经根粘连、促进炎症的吸收、缓解疼痛的目的,取得了较好的治疗效果^[18]。黄菊英等^[19]利用健康腰椎影像资料,使用医学图像处理软件和逆向工程软件,分别建立L4~5运动节段的椎骨和椎间盘模型,在有限元分析软件中附加腰椎相

关韧带,建立L4~5运动节段有限元模型,构建正常模型和椎间盘突出模型(通过改变髓核和纤维环的弹性模量和泊松比建立);运用有限元方法模拟在轴向压缩、前弯、侧弯、旋转和后伸5种载荷下,正常椎间盘和突出椎间盘的生物力学特征参数。结果显示,正常椎间盘在相同载荷下,后伸时的应力小于轴向正压力时的应力;在相同载荷下,椎间盘突出模型的小关节突接触力比正常模型大,这种趋势以后伸、旋转的轴向压力尤为明显,故证实了在椎间盘突出后,腰椎稳定性下降。吕立江等^[20-21]在传统后伸扳法的基础上,改良创造了杠杆定位手法;采集自愿者CT数据,进行三维重建并构建后伸40°体位,然后建立L3~S1节段三维有限元模型,同时构建无腰椎肌肉和有腰椎肌肉两组对比模型,根据后伸40°体位时实际杠杆定位手法测量的力学参数设置边界条件;该有限元分析结果表明,腰部肌肉对于手法具有明显的协同和拮抗作用,腰椎肌肉模型计算的腰部椎体各部分应力分布更自然合理。另外,证实后伸40°体位时杠杆定位手法使纤维环有明显的回纳作用,髓核的前中部内压增大。

2.2 斜扳手法

腰椎斜扳法是推拿的常用方法之一,符合力学中的杠杆原理,在对脊柱源性疾病的治疗中有较好的治疗作用^[22]。操作时患者左侧(右侧)卧位,双下肢在上者屈膝屈髋,在下者伸直,术者一手推按患者肩前部或肩后部,另一手抵住患者臀部或髂前上棘,将患者腰部旋转至最大限度后,再作稍增大幅度、有控制的突发性旋转扳动。国内有观点认为,以自身经验为主要依据的手法教学及临床操作存在相当的主观性和随意性,这也许是斜扳手法发生意外事件的潜在风险之一^[23]。因此,有限元分析方法应用于定位定量和规范化研究,能够为提高斜扳手法安全性提供理论依据。毕胜等^[24]应用生物力学方法和三维有限元模型,通过比较腰椎内部结构的变化,模拟腰椎在不同的腰椎手法作用下的状况。结果发现,斜扳手法使髓核内的压力显著增加,导致一定的椎间盘后外侧和神经根之间的移位。徐海涛等^[25]使用正常腰椎影像资料,建立了L4~5三维有限元模型;通过模拟腰椎斜扳手法将该手法分解,各项力

学参数均代入有限元模型进行分析,证实手法作用时椎间盘的应力远小于后部结构,从椎间盘中心到右侧有一个向后的扭转矢量,使椎间盘产生变形,故证明腰椎斜扳手法对椎间盘是安全的。但是大量的有限元腰椎斜扳手法模拟都是从手法作用对内部结构的力学影响进行研究,而针对手法作用时机以及具体适应症的研究较少。

2.3 旋转类手法

腰椎旋转手法是腰椎间盘突出症的常用手法之一,近年来得到了深入的研究。操作时(以右侧为例),助手面对受试者站立,用两腿夹住患者右侧下肢,双手压住大腿根部,维持患者正坐姿势。术者坐于患者之后,将右手由患者腋下伸向右后方,使右手扣于其颈后,将左手拇指置于偏歪棘突的右侧,使患者向前弯腰并向右侧旋转,同时用左拇指将偏歪棘突推向左侧。徐海涛等^[26]通过建立L4~5的三维有限元模型,模拟右侧腰椎旋转手法,探讨腰椎旋转手法在不同前屈状态下对椎间盘的影响。结果表明,对于正常腰椎,椎间盘左侧后缘的应力随着腰椎前屈角度的增大而增大,但椎间盘无明显后突;对于退变腰椎,椎间盘右侧后缘的应力和位移均随着腰椎前屈角度的增大而增大,在前屈12°时椎间盘右侧后缘明显后突,故认为该手法不会造成椎间盘损伤。胡华等^[27]对腰、骨盆、股骨上端进行有限元建模,约束双侧股骨远端的部分,检测所得的腰椎位移值比以往文献中的稍大,推测与约束及加载的范围有关;但对于腰椎和椎间盘的应力和应变,其结果基本保持一致。尽管近年来有限元研究有了长足的进展,但由于旋转类手法的具体操作较多,多数模拟研究并不统一,甚至出现相矛盾的结果,缺乏对比研究。

3 有限元在周围软组织及椎体力学稳定性中的应用

目前,有限元模型能够真实地模拟椎体和椎间盘,并将韧带、肌肉加入模型,使仿真更真实、更完美。肌肉和软组织保持脊柱的稳定性和负载能力是一个重要的作用,研究表明,腰部肌群之间的相互关系,有效地控制了椎间盘的核心压力,通过改变肌肉的激活降低退变椎间盘的压力,可以延缓椎间盘退

变的进展^[28]。中医手法基本上通过运动带动软组织的被动受力,进而作用于腰椎,达到治疗的效果。Hedenstierna等^[29]通过特有的参数设置将肌肉力量和瞬时形变连接在一起构成肌肉本构模型,并耦合到颈椎有限元模型,预测出在撞击诱导的运动中不同分布的颈部肌肉载荷。但是,肌肉力量的估计在大多数肌肉骨骼模型中主要依靠逆向计算和静态优化,其限制了数值计算的预测能力。因此,Toumanidou等^[30]将赋予组织拮抗性的预测肌肉模型与L3~S1肌肉骨骼的有限元模型耦合,通过测量在活体椎间盘内的压力值的变化范围发现,椎间盘肿胀导致肌肉活动和肌肉力量的分布适合于在站立位时抵消身体前部质量所产生的影响。其模拟研究指出,可能存在的拉伸诱导的肌肉激活与椎间盘多物理场(位移场、电磁场、温度场、流场)仿真模块之间的功能平衡,为提高腰椎机械稳定性提出新的思考。Ouaaid等^[31]在腰椎肌肉骨骼三维几何模型和力学模型的基础上,建立了腰椎运动学和动力学仿真分析模型。通过输入运动轨迹,可以驱动仿真模型完成相应的运动,并计算出相应的动力学参数。利用EMG信号辅助预测参与运动肌肉的肌肉力,将预测所得肌肉力和动力学仿真分析结果作为有限元模型的边界条件,证实在L5~S1水平上拉力的高度、方向和幅度发生变化时,肌肉响应、脊柱负荷和稳定性有很大差别。在向上的拉力作用下,所有高度的腰椎水平上计算所得脊柱载荷最小,躯干稳定性最大。这些发现在康复训练以及更安全的活动设计方面具有重要的影响。同时,目前手术矫正椎体失衡恢复的量的估计仍然是基于临床经验^[32],有限元分析和数值优化已被证明是可行的,可以优化更科学的方法,预测术后脊柱载荷、应力和肌肉激活。由此可知,腰椎周围软组织包括肌肉、韧带等与椎体稳定性的相互影响是有限元研究的必趋之势和难点所在,也是脊柱有限元研究的重要挑战和方向之一。

4 结论

近年来,很多研究者都致力于建立标准化和精确化的模型,为未来的研究提供科学、有效和全面的研究平台。国内外关于腰椎手法的有限元分析研究

总体趋势基本保持一致,但存在以下不足:①人类的脊柱解剖和生物力学被证实是普遍有效的,但病理畸形、先天性和退行性可能导致脊柱稳定性和矢状面失衡^[33]。同时,椎间盘、关节突关节以及腰椎肌肉群不同程度的退变,均会导致腰椎节段的受力不平衡^[34]。因此,腰椎疾患多伴有腰椎的退变或邻近椎体的不稳性,在手法治疗的有限元模型研究中应考虑其影响。②大量的文献研究发现,目前的模型软组织(韧带、肌肉等)数据大多是参考解剖学结论或根据个人理解所添加的,数据与实际存在一定的误差^[35],而国内资料也有相当大一部分参考的是国外资料,但是外国人与国人在体格方面有很大的差异,且软组织性能测试工作欠缺,这些缺陷都要求进一步深入了解与分析。③过去对腰椎手法的有限元分析,节段的分析主要集中在L4、L5,可以预测,对腰椎手法模拟操作,很难说只有L4、L5节段是足够的,且目前全腰椎模型主要集中在静态模型的研究,外部作用力的方向和高度变化对脊柱负荷评估的影响通常在许多研究和回归方程中是被忽略的^[36]。因此,在模拟中医手法时,应该充分考虑手法作用的方向和作用点高度变化对模拟过程产生的影响,深入动态模拟的研究。④腰椎病伴有不同程度的骨质疏松者,目前对此类模型的力学加载条件的安全范围仍欠缺完善的研究。⑤目前的有限元模型未考虑肌肉收缩的机械效应和负载条件,不符合真正的生理条件^[37],需要开展更多的研究以进一步澄清这些影响。

目前,有限元分析在腰椎手法治疗的模拟研究中已经备受关注,腰椎的三维有限元建模技术已经非常成熟,一般的腰椎应力分析所使用模型在几何、载荷、边界、材料4个方面均能够达到良好的相似性,但是鉴于软组织材料性质、力学性能的测试方法不统一,有限元软件的限制以及目前研究仅限于对手法治疗进行简单的模拟试验,造成模拟腰椎手法的模型建立与真实条件的材料、载荷和边界约束相似性存在很大差异,会影响有限元分析的准确性及可信度,故今后对于腰部肌肉、韧带或者其他材料进行生物力学研究,有待于提出标准化测试方法,同时对模拟方法进行标准化和精确化的统一,确保有限

元分析过程及结果准确可信。相信未来随着有限元技术的进一步发展,必然会导致腰椎手法治疗相关生物力学研究领域的广泛变革,特别是将会在手法合适体位设计、操作方式改进以及施加手法后效果的评估方面,取得长足的进步。

参考文献:

- [1] BIALOSKY JE, GEORGE SZ, HORN ME, et al. Spinal manipulative therapy specific changes in pain sensitivity in individuals with low back pain (NCT01168999) [J]. *J Pain*, 2014, 15(2): 136-148.
- [2] RUBINSTEIN S, VAN MIDDELKOOP M, ASSENDELFT W, et al. Spinal manipulative therapy for chronic low-back pain: An update of a cochrane review [J]. *Spine*, 2011, 36(13): E825-E846.
- [3] PANJABI MM. Cervical spine models for biomechanical research [J]. *Spine*, 1998, 23(24): 2684-2700.
- [4] 黄宇峰,潘福敏,赵卫东.关于腰椎三维有限元模型的建模及有效性验证[J].*生物骨科材料与临床研究*, 2015, 12(5): 16-19.
- [5] 胡勇,谢辉,杨述华.三维有限元分析在脊柱生物力学中应用研究[J].*医用生物力学*, 2006, 21(3): 246-250.
- [6] HU Y, XIE H, YANG SH. Utilization of three-dimensional finite element method in spinal biomechanics [J]. *J Med Biomech*, 2006, 21(3): 246-250.
- [7] ZHANG QH, TEO EC, NG HW, et al. Finite element analysis of moment-rotation relationships for human cervical spine [J]. *J Biomech*, 2006, 39(1): 189-193.
- [8] LIN HS, LIU YK, RAY G, et al. System identification for material oriperties of the intervertebral joint [J]. *J Biomech*, 1978, 11(1-2): 1-14.
- [9] SIMON BR, WU J SS, CARLTON MW, et al. Structural models for human spinal motion segments based on a poroelastic view of the intervertebral disc [J]. *J Biomech Eng*, 1985, 107(4): 327-335.
- [10] SPILKER RL, JAKODS DM, SCHULTZ AB. Material constants for a finite element model of the intervertebral disk with a fiber composite annulus [J]. *J Biomech Eng*, 1986, 108(1): 1-11.
- [11] NATALI AN. A hyperelastic and almost incompressible material model as an approach to intervertebral disc analysis [J]. *J Biomed Eng*, 1991, 13(2): 163-168.
- [12] RAO AA, DUMAS GA. Influence of material properties on the mechanical behaviour of the L5-S1 intervertebral disc in compression: A nonlinear finite element study [J]. *J Biomed Eng*, 1991, 13(2): 139-151.
- [13] SHIRAZI-ADL A. Nonlinear stress analysis of the whole lumbar spine in torsion-mechanics of facet articulation [J]. *Spine*, 1994, 27(3): 289-299.
- [14] ZANDER T, ROHLMANN A, BURRA NK, et al. Estimation of muscle forces in the lumbar spine during upper-body inclination [J]. *Clin Biomech*, 2001, 16(1): 73-80.
- [15] CAO L, GUILAK F. Pericellular matrix mechanics in the annulus fibrosus predicted by a three-dimensional finite element model and *in situ* morphology [J]. *Cell Mol Bioeng*, 2009, 2(3): 306-319.
- [16] 叶淦湖,张美超,李义凯.模拟推拿时腰椎小关节有限元模型的生物力学分析[J].*广州中医药大学学报*, 2003, 20(3): 195-197.
- [17] 苏晋,赵文志,陈秉智,等.建立全腰椎有限元接触模型[J].*医用生物力学*, 2010, 25(3): 200-205.
- [18] SU J, ZHAO WZ, CHEN BZ, et al. Establishing finite element contact model of human L1 ~ L5 lumbar segments [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(3): 200-205.
- [19] 秦计生,王昱,彭雄奇,等.全腰椎三维有限元模型的建立及其有效性验证[J].*医用生物力学*, 2013, 28(3): 321-325.
- [20] QIN JS, WANG Y, PENG XQ, et al. Three-dimensional finite element modeling of whole lumbar spine and its biomechanical analysis [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(3): 321-325.
- [21] 白刚田.屈伸整复法治疗腰椎间盘突出症92例[J].*中国民间疗法杂志*, 2001, 9(11): 21-23.
- [22] 黄菊英,李海云,吴浩.腰椎间盘突出症力学特征的仿真计算方法[J].*医用生物力学*, 2012, 27(1): 96-101.
- [23] HUANG JY, LI HY, WU H. Simulation calculation on biomechanical properties of lumbar disc herniation [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(1): 96-101.
- [24] 吕立江,袁相龙,应晓明,等.杠杆定位手法治疗腰椎间盘突出症的疗效观察[J].*中医正骨*, 2010, 22(3): 14-16.
- [25] 吕立江,冯喆,廖胜辉,等.杠杆定位手法对腰椎间盘突出症的有限元分析[J].*中华中医药学刊*, 2014, 32(5): 971-973.
- [26] 吉登军,刘鲲鹏,顾非.腰椎扳法的研究进展[J].*中国医药导报*, 2015, 12(13): 32-35.
- [27] 王辉昊,詹红生,张明才,等.手法治疗颈椎病意外事件分析与预防策略思考[J].*中国骨伤*, 2012, 25(9): 730-736.
- [28] 毕胜,李义凯,赵卫东,等.腰部推拿手法生物力学和有限元比较研究[J].*中华物理学与康复杂志*, 2002, 24(9): 525-527.
- [29] 徐海涛,李松,刘澜,等.腰椎斜扳手法时椎间盘的有限元分析[J].*中国组织工程研究与临床康复*, 2011, 15(13): 2335-2338.
- [30] 徐海涛,张美超,徐达传,等.三种前屈角度下坐位旋转手法

- 对腰椎间盘作用的有限元分析[J]. 中国疗养医学, 2008, 17(2): 65-67.
- [27] 胡华, 熊昌源, 韩国武. 旋转手法对腰椎骨盆和股骨上端结构有限元模型的分析[J]. 中国骨伤, 2012, 25(7): 582-588.
- [28] KIM YE, CHOI HW. Effect of disc degeneration on the muscle recruitment pattern in upright posture: A computational analysis [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2015, 18(15): 1622-1631.
- [29] HEDENSTIERNA S, HALLDIN P. How does a three-dimensional continuum muscle model affect the kinematics and muscle strains of a finite element neck model compared to a discrete muscle model in rear-end, frontal, and lateral impacts [J]. *Spine*, 2008, 33(8): E236-E245.
- [30] TOUMANIDOU T, NOAILLY J. Musculoskeletal modeling of the lumbar spine to explore functional interactions between back muscle loads and intervertebral disk multiphysics [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2015, 3: 111.
- [31] OUAAID Z EL, SHIRAZI-ADL A, PLAMONDON A. Effects of variation in external pulling force magnitude, elevation, and orientation on trunk muscle forces, spinal loads and stability [J]. *J Biomech*, 2016, 49(6): 946-952.
- [32] LAMARTINA C, BERJANO P, PETRUZZI M, *et al.* Criteria to restore the sagittal balance in deformity and degenerative spondylolisthesis [J]. *Eur Spine J*, 2012, 21 (Suppl 1): S27-S31.
- [33] ROUSSOULY P, PINHEIRO-FRANCO JL. Biomechanical analysis of the spino-pelvic organization and adaptation in pathology [J]. *Eur Spine J*, 2011, 20 (Suppl 5): 609-618.
- [34] 王亮, 卢旭华. 退行性腰椎侧凸生物力学的研究进展[J]. 中国骨科临床与基础研究杂志, 2013, 5(4): 241-245.
- [35] 霍莉峰, 倪衡建. 数字骨科应用与展望: 更精确、个性、直观的未来前景[J]. 中国组织工程研究, 2015, 19(9): 1457-1462.
- [36] ARJMAND N, EKRAMI O, SHIRAZI-ADL A, *et al.* Relative performances of artificial neural network and regression mapping tools in evaluation of spinal loads and muscle forces during static lifting [J]. *J Biomech*, 2013, 46(8): 1454-1462.
- [37] TANG S. Does TLIF aggravate adjacent segmental degeneration more adversely than ALIF? A finite element study [J]. *Turk Neurosurg*, 2012, 22(3): 324-328.