

· 基础研究 ·

L₅/S₁ 轴向联合斜向螺钉内固定术的生物力学研究

李庆龙,倪文飞,吴爱悯,黄哲宇,徐海超,冯斐

【摘要】目的 通过研究后方双侧斜向螺钉,轴向螺钉联合后方双侧斜向螺钉和椎弓根螺钉钉棒系统3种内固定方式的生物力学性能,探索轴向螺钉联合后方双侧斜向螺钉是否满足L₅/S₁内固定生物力学稳定性的要求。**方法** 取9具成人新鲜尸体腰椎标本(生前无脊柱疾病史),进行骨密度测量,排除骨质疏松病变;并进行X线扫描,排除解剖学异常。剔除标本上的肌肉组织,保留椎间盘、韧带及骨性结构的完整性。将标本随机分为后方双侧斜向螺钉组(A组)、轴向螺钉联合后方双侧斜向螺钉组(B组)及椎弓根螺钉钉棒系统组(C组)。用牙托粉对标本L₅和S₁端椎体部分包埋,在生物力学机上完成前屈后伸、左右侧曲及轴向旋转实验。记录施加载荷时椎体前屈后伸、左右侧曲条件下的位移和轴向旋转的角度,完成9具标本的测试与记录。所有的测量数据应用SPSS 19.0软件进行统计学分析。**结果** 在前屈后伸实验中,载荷范围内3组椎体的位移随载荷的增加而增加,在最大载荷下各组间差异有统计学意义($P < 0.05$)。进行两两比较发现,A组和B组差异有统计学意义($P < 0.05$),A组和C组差异有统计学意义($P < 0.05$),B组和C组差异无统计学意义($P > 0.05$)。在左右侧曲实验中,载荷范围内3组椎体的活动度随载荷的增加而增加,在最大载荷下3组间差异无统计学意义($P > 0.05$)。在轴向旋转实验中,扭矩范围内3组旋转角度随扭矩的增加而增加,在最大扭矩下分析各组旋转角度,3组间差异无统计学意义($P > 0.05$)。**结论** 轴向联合后方双侧斜向螺钉内固定能够达到与椎弓根钉棒系统接近的生物力学稳定性。后方双侧斜向螺钉在左右侧曲及轴向旋转方面具有相对稳定的生物力学特性,联合应用轴向螺钉可使L₅/S₁获得更强的稳定性。

【关键词】腰椎;椎间盘退行性变;内固定器;生物力学

【中图分类号】R 318.01 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1672-2957(2015)06-0377-05

【DOI】doi:10.3969/j.issn.1672-2957.2015.06.014

Biomechanical study of novel bilateral oblique screw combined axial screw in L₅/S₁ internal fixation LI Qing-long, NI Wen-fei, WU Ai-min, HUANG Zhe-yu, XU Hai-chao, FENG Fei. Department of Orthopaedics, Second Affiliated Hospital of Wenzhou Medical University, Wenzhou 325027, Zhejiang, China

【Abstract】 Objective To investigate the biomechanical properties of 3 different L₅/S₁ internal fixations, including bilateral oblique screw fixation, bilateral oblique screw combined axial screw fixation and pedicle screw fixation. **Methods** Nine fresh cadaver lumbar spine specimens with no history of spinal diseases were obtained. Bone mineral density was tested to exclude osteoporosis, and roentgenograph was examined to exclude abnormal anatomy. The muscle tissue was dissected, and the integrity of intervertebral discs, ligaments and bony structure were preserved. The specimens were randomly divided into 3 groups:bilateral oblique screw fixation group (Group A), bilateral oblique screw combined axial screw fixation group (Group B) and pedicle screw fixation group (Group C). Both L₅ and S₁ ends of the specimens were embedded with denture acrylic. Then, flexion and extension, left and right lateral bending and axial rotation tests were performed by biomechanical testing machine. The displacements and rotative angles were recorded, and the data were input into the SPSS 19.0 software for statistical analysis. **Results** In the flexion and extension test, the displacements among 3 groups showed statistically significant difference ($P < 0.05$). In comparison with each other, there was statistically significant difference between Group A and Group B ($P < 0.05$), Group A and Group C ($P < 0.05$). However, there was no statistically significant difference between Group B and Group C ($P > 0.05$). In the displacements of left and right lateral bending test, no statistically significant difference was observed among the 3 groups ($P > 0.05$). In rotative angles of the left and right rotation, no statistically significant difference was observed among the 3 groups ($P > 0.05$). **Conclusion** The study suggests that bilateral oblique screw combined axial screw fixation has the similar biomechanical properties to pedicle screw fixation. Bilateral oblique screw fixation has comparable biomechanical properties in lateral bending and axial rotation, but not in flexion and extension. The axial screw fixation can provide better anti-flexion and extension biomechanical properties to the bilateral oblique screw fixation in L₅/S₁ level.

【Key words】Lumbar vertebrae; Intervertebral disc degeneration; Internal fixators; Biomechanics

J Spinal Surg, 2015, 13(6):377-381

基金项目:国家自然科学基金(81501933);浙江省卫生厅骨干人才项目(2012RCB037)

作者简介:李庆龙(1989—),硕士,医师(现工作于四川省骨科医院)

作者单位:325027 浙江,温州医科大学第二附属医院骨科

通信作者:倪文飞 wenfeini@yeah.net

退变性腰椎疾病常需要实施腰椎融合,有研究表明后外侧融合术的融合率显著低于椎间融合术^[1-2]。对于椎间融合术,目前应用最广泛的内固

定是椎弓根钉棒系统。其缺点在于组织损伤大,出血多,住院时间长,发生并发症的风险高达19.0%。轴向腰椎间融合术于2004年由Cragg等^[3]报道,是一种经骶前间隙入路的腰骶椎椎间融合术^[4-5],其单纯轴向固定抗旋转能力差,需结合其他内固定方式提升生物力学稳定性,且要考虑后方进一步手术的创伤和并发症。斜向内固定最初应用于L₅/S₁节段的滑移患者,作为后路椎弓根钉棒系统的下位固定钉,起到更好的稳定作用^[6-8]。斜向固定加强了三柱的稳定性,降低了术后内固定松动和断裂的风险,其缺点在于对前柱的稳定效果相对较差。对于腰椎融合术,特别是L₅/S₁融合术,究竟采取何种内固定方式仍存在争议。本研究在后方双侧斜向螺钉内固定加强三柱稳定性的基础上,给予轴向螺钉加强前柱的稳定性。通过综合对比后方双侧斜向螺钉、轴向螺钉联合后方双侧斜向螺钉和椎弓根螺钉钉棒系统3种内固定方式的生物力学差异,探索轴向螺钉联合后方双侧斜向螺钉是否满足L₅/S₁融合内固定的生物力学稳定性要求。

1 材料与方法

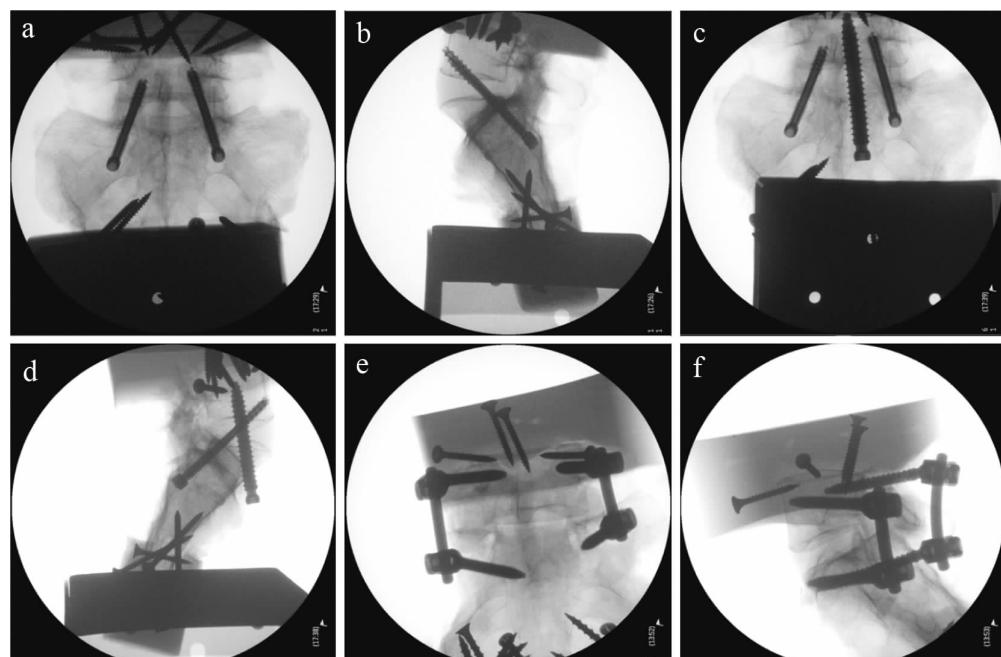
1.1 实验对象与器材

采用新鲜成人尸体腰椎标本9具(温州医科大学解剖学教研室提供),其中男性3具、女性6具,生前无脊柱疾病史。年龄41~65岁,平均52岁。所有标本均进行骨密度测量,排除骨质疏松病变;并进

行影像学扫描,排除解剖学异常、椎体滑脱及腰椎峡部裂等腰椎不稳定情况。在实验开始前,所有标本-20℃冷冻保存。实验开始时,室温下缓慢解冻。剔除标本上的肌肉组织,保留椎间盘、韧带及骨性结构的完整性。用牙托粉对标本L₅和S₁端椎体部分包埋,留做备用。腰椎椎弓根钉棒系统螺钉(直径6.5 mm、长50.0 mm,棒直径5.5 mm、长60.0 mm)、轴向螺钉(直径6.0 mm、长30.0 mm)、后方斜向螺钉(直径6.0 mm、长45.0 mm)均为浙江广慈医疗器械公司生产,BOSE生物力学实验机由温州医科大学骨科重点实验室提供。

1.2 实验分组与模型制备

3具男性标本及6具女性标本各随机分成3组,每组包括1具男性标本和2具女性标本,各组分别行不同的内固定方式。后方双侧斜向螺钉组(A组),由于髂骨的阻挡,斜向螺钉的进钉点位于S₁后孔水平和S₁上关节突外缘交点处,螺钉通道与上位椎体下表面交点位于上位椎体下表面中点前方,与上位椎体前缘交点位于上位椎体前缘中点下方。轴向螺钉联合后方双侧斜向螺钉组(B组),在上述置入后方双侧斜向螺钉的基础上,在S₁/S₂水平,由S₁/S₂横线中点处向上方穿过L₅/S₁椎间隙置入轴向螺钉。弓根螺钉钉棒系统组(C组),置钉点选择在上关节突中点的垂线和横突中线的交点处(Roy-Camille定位法)^[9]。各组正侧位X线透视片见图1。



a,b;A组 c,d;B组 e,f;C组
a,b;Group A c,d;Group B e,f;Group C

图1 3组X线透影视像

Fig. 1 X-ray perspective view of 3 groups

1.3 测量方法

将 S_1 包埋端固定于加载仪底座, L_5 包埋端与加载盘固定, 应用 BOSE 生物力学实验机依次对每具标本进行测试。通过加载盘对标本采用连续加载-卸载方式, 先在腰椎节段屈服极限内(100 N)反复预加载4~5次, 不记录数值, 以避免标本黏弹性作用对实验结果的影响。随后在生物力学机上完成9具标本的前屈后伸, 左右侧曲及轴向旋转实验。在标本上打入6枚三维标志物, 应用三维激光扫描仪摄取在零载荷和最大载荷时的运动图像, 并进行图像分析及数据转换, 计算出测量节段椎体活动范围。

前屈后伸和左右侧曲实验, 在施加载荷时保持匀速加载, 最大载荷400 N, 速度为10 N/s; 轴向旋转实验, 在施加载荷时保持匀速加载, 最大扭矩为3 N·m, 加载速度为0.1 N·m/s, 同步分析记录椎体的活动度(range of motion, ROM)。每次测试重复5次加载-卸载循环, 每个循环后停留20 s左右, 以减小标本黏弹性作用的影响。测试中, 不断用0.9% 生理盐水喷洒标本, 保持其湿润, 防止组织脱水、变性。完成9具标本测试与记录。

1.4 统计学处理

采用SPSS 19.0软件进行数据分析, 计量资料

以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 同种载荷下3组内固定方式椎体ROM采用单因素方差分析。若3组间差异有统计学意义, 则进一步两两比较, 采用最小显著性差异法进行配对t检验, $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结 果

前屈后伸实验中, 载荷范围为0~400 N。在此范围内, 3组椎体的ROM随载荷的增加而增加。在最大载荷下分析各组ROM, 3组间差异有统计学意义($P < 0.05$)。进一步两两比较发现, A组和B组差异有统计学意义($P < 0.05$), A组和C组差异有统计学意义($P < 0.05$), B组和C组差异无统计学意义($P > 0.05$)。

左右侧曲实验中, 载荷范围为0~400 N。在此范围内, 3组椎体的ROM随载荷的增加而增加。在最大载荷下分析各组ROM, 3组间差异无统计学意义($P > 0.05$)。

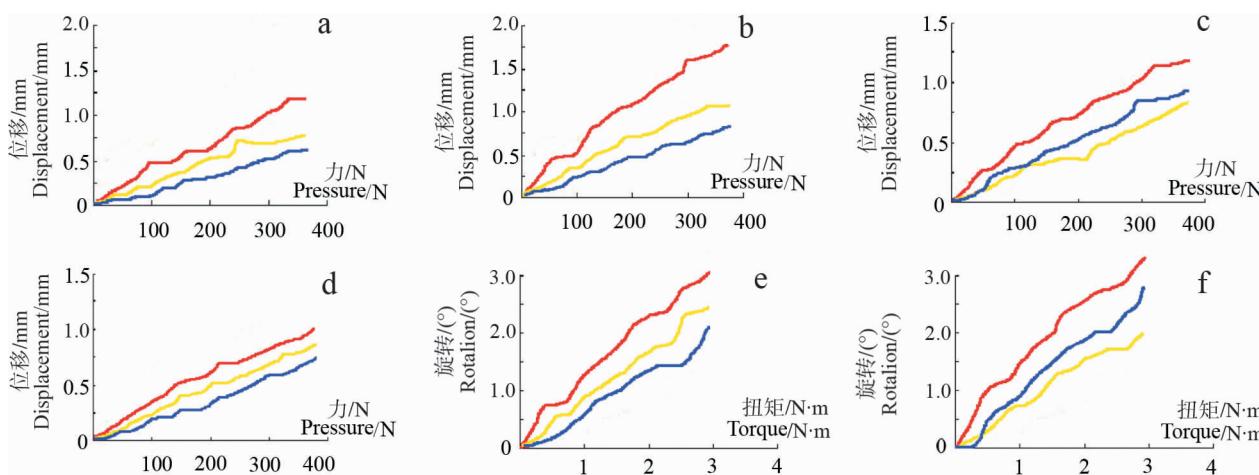
轴向旋转实验中, 加载扭矩为0~3 N·m。在此范围内, 3组的旋转角度随扭矩的增加而增加。在最大扭矩下分析各组旋转角度, 3组间差异无统计学意义($P > 0.05$)。

3组在不同载荷下椎体ROM见表1。3组在不同载荷下椎体ROM与载荷量关系见图2。

表1 3组最大载荷下椎体ROM
Table 1 ROM of 3 groups under maximum loading

$n = 3, \bar{x} \pm s$

组别 Group	前屈/mm Flexion/mm	后伸/mm Extension/mm	左侧曲/mm Left bending/mm	右侧曲/mm Right bending/mm	左旋转/(°) Left rotation/(°)	右旋转/(°) Right rotation/(°)
A	1.63 ± 0.37	1.96 ± 0.39	1.27 ± 0.30	1.14 ± 0.26	3.11 ± 0.68	3.22 ± 0.73
B	0.74 ± 0.19	0.96 ± 0.22	0.84 ± 0.17	0.88 ± 0.18	2.85 ± 0.52	2.68 ± 0.34
C	0.69 ± 0.22	0.83 ± 0.18	0.97 ± 0.23	0.83 ± 0.19	2.73 ± 0.37	2.96 ± 0.43



a:前屈 b:后伸 c:左侧曲 d:右侧曲 e:左旋转 f:右旋转 红:A组 黄:B组 蓝:C组
a:Flexion b:Extension c:Left lateral bending d:Right lateral bending e:Left rotation f:Right rotation Red:Group A Yellow:Group B Blue:Group C

图2 3组在不同载荷下椎体ROM与载荷量关系

Fig. 2 Relationship of ROM and loading of 3 groups under different loading

3 讨 论

3.1 相关生物力学研究

Akesen 等^[10]在 2008 年采用新鲜尸体标本进行研究,发现单纯的轴向融合减少了 40% 的椎体 ROM,但在某些情况下可能无法达到稳定的椎间融合;双侧螺钉固定在轴向旋转和左右侧曲方面分别减少了 64% 和 70% 的 ROM,在前屈后伸方面减少 50% 的 ROM;关节突螺钉和椎弓根钉棒系统在所有载荷下均具有较高的稳定性;轴向螺钉联合关节突螺钉在轴向旋转、左右侧曲、前屈后伸方面较完整椎体分别减少了 70%、80% 和 90% 的 ROM;轴向螺钉联合椎弓根钉棒系统在轴向旋转、左右侧曲、前屈后伸方面较完整椎体分别减少了 73%、87% 和 88% 的 ROM。另外,轴向螺钉联合关节突螺钉和轴向融合联合椎弓根钉棒系统比较,在轴向旋转、前屈后伸及左右侧曲方面差异均没有统计学意义。

St Clair 等^[11]报道在前屈后伸方面,后方双侧斜向螺钉较完整椎体减少了($36 \pm 14\%$)% 的 ROM,而椎弓根钉棒系统较完整椎体减少了($27 \pm 22\%$)% 的 ROM;在左右侧曲方面,二者较完整椎体减少的 ROM 分别为($32 \pm 13\%$)% 和 ($32 \pm 24\%$)%。在前屈后伸和左右侧曲方面,后方双侧斜向螺钉和椎弓根钉棒系统差异没有统计学意义。Minamide 等^[12]通过生物力学研究表明,斜向螺钉内固定的刚度是椎弓根钉棒系统的 1.6 ~ 1.8 倍。Totoribe 等^[13]通过有限元分析模型发现,椎间融合与后外侧融合相比,刚度显著提高,生物力学稳定性显著提升。Erulkar 等^[14]通过动物模型分析发现,后外侧融合可以显著提高融合节段的屈曲稳定性,使融合节段的活动范围降低 61% ~ 83%,但融合节段仍有部分活动。有研究认为,前柱主要承受轴向压缩应力,而后柱对抗张力,腰椎后方的张力带结构只有在前柱结构完整时才能发挥作用^[15-16]。因此,前柱的固定在腰椎融合固定术中的地位尤为重要。本组生物力学测试表明,在前屈后伸、左右侧曲和轴向旋转方面,轴向联合后方双侧斜向螺钉内固定能够达到与椎弓根钉棒系统接近的生物力学稳定性。

内固定本身的强度是没有临床意义的,但脊柱和内固定产生的固定结构的生物力学稳定性与椎体的融合成功率相关。强度更高的内固定可以确保植骨块与植骨床在压力状态下的紧密接触,为腰椎融合创造一个较好的生物力学环境,提高融合成功率。

本次实验结果表明,L₅/S₁ 轴向联合斜向螺钉内固定具有较高强度的生物力学稳定性,有助于腰骶椎更牢固的融合。

3.2 前景展望

轴向融合联合后路椎弓根钉棒系统治疗下腰椎疾病在国内已有较多报道。宋西正等^[17]采用经皮椎弓根螺钉内固定联合轴向椎间融合术治疗 17 例 L₅ 椎体滑脱症患者,所有病例术后 6 个月 CT 三维重建显示均达到骨性融合。然而,即使是经皮椎弓根螺钉内固定,与后方斜向螺钉内固定相比仍具有组织破坏和手术创伤大(至少需 4 个小切口)、术后并发症发生率高等缺点。笔者认为,在严格掌握适应证的前提下,轴向联合斜向螺钉内固定这种“组合微创”的手术方式对腰椎结构破坏小、出血少、并发症发生率低,或许是腰骶椎融合术的可选择的有效方法之一。

L₅/S₁ 轴向联合斜向螺钉内固定行椎间融合主要挑战在于需行 2 种内固定方式。对于轴向内固定而言,该术式不破坏双侧关节突关节、椎旁肌及韧带等结构,不暴露椎体前方、后方及侧方的结构,不显露及牵拉硬膜囊和神经根,无需进入腹腔,不损伤腹腔内血管和脏器,具有显著的微创效果。有文献报道其并发症发生率低于腹腔镜下前路腰椎手术,但是轴向融合的手术入路涉及直肠、髂血管、骶前静脉丛、骶中动脉、骶神经根等重要解剖结构,且术中操作需紧贴直肠后方和骶骨前缘,导针和套筒在沿骶前间隙走行和在骶骨表面进行骨穿刺时有可能损伤周围的直肠、血管和神经^[18-19]。国人与外国人体型存在差异,周围组织结构有一定的特殊性,因此国内行轴向内固定的手术切口和具体手术方式与国外也有一定的不同,需要手术医师对该部位解剖非常熟悉。此外,该手术切口部位护理困难,存在切口感染、无法愈合等并发症^[20]。总而言之,尽管 L₅/S₁ 腰椎轴向联合斜向螺钉内固定行椎间融合具有较高强度的生物力学稳定性,但是其安全性、可行性仍需进一步研究验证。

3.3 研究局限性

本研究比较了 3 种内固定方式的生物力学差异,比较结果和各内固定组的测量数值可能与其他文献报告存在差异,原因可能在于使用的内固定器械不同,如螺钉的直径和长度、棒的规格及器械材料差异等。本次实验结果仅对实验中使用的特定内固定器械适用。此外,由于不同个体在骨密度上存在

一定差异,尽管本次实验所有标本在实验开始前已进行骨密度扫描,排除了骨质疏松的可能,但仍可能对实验结果产生影响。生物力学实验设计上,有报道在同一标本上序贯完成几种内固定方式进行生物力学测量,以减少标本差异对实验结果的影响,但是由于前一种内固定对组织结构的破坏不可避免地会对之后几组内固定的测量结果产生影响,降低实验结果的准确性。本次生物力学实验测量结果仅为临床提供参考,事实上临幊上内固定方式的选择必须考虑多种因素,如病变的严重程度、患者的耐受情况、手术相关风险、并发症及经济因素等,临幊医师必须综合考虑各种因素,慎重选择个体化的治疗方案。

综上所述,本研究从生物力学的角度表明L₅/S₁轴向联合后方双侧斜向螺钉内固定能够达到与椎弓根钉棒系统接近的生物力学稳定性。后方双侧斜向螺钉可以维持一定的三柱稳定性,在左右侧曲及轴向旋转方面具有相对稳定的生物力学特性,联合应用轴向螺钉加强前柱的稳定性之后,可以使L₅/S₁获得更强的稳定性。

参 考 文 献

- [1] Zhou ZJ, Zhao FD, Fang XQ, et al. Meta-analysis of instrumented posterior interbody fusion versus instrumented posterolateral fusion in the lumbar spine[J]. *J Neurosurg Spine*, 2011, 15(3):295-310.
- [2] Liu X, Wang Y, Qiu G, et al. A systematic review with meta-analysis of posterior interbody fusion versus posterolateral fusion in lumbar spondylolisthesis[J]. *Eur Spine J*, 2014, 23(1):43-56.
- [3] Cragg A, Carl A, Casteneda F, et al. New percutaneous access method for minimally invasive anterior lumbosacral surgery[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2004, 17(1):21-28.
- [4] Ledet EH, Tymeson MP, Salerno S, et al. Biomechanical evaluation of a novel lumbosacral axial fixation device [J]. *J Biomech Eng*, 2005, 127(6):929-933.
- [5] Erkan S, Wu C, Mehbod AA, et al. Biomechanical evaluation of a new AxiaLIF technique for two-level lumbar fusion [J]. *Eur Spine J*, 2009, 18(6):807-814.
- [6] Abdu WA, Wilber RG, Emery SE. Pedicular transvertebral screw fixation of the lumbosacral spine in spondylolisthesis. A new technique for stabilization[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1994, 19(6):710-715.
- [7] Grob D, Humke T, Dvorak J. Direct pediculo-body fixation in cases of spondylolisthesis with advanced intervertebral disc degeneration[J]. *Eur Spine J*, 1996, 5(4):281-285.
- [8] Birkenmaier C, Suess O, Pfeiffer M, et al. The European multicenter trial on the safety and efficacy of guided oblique lumbar interbody fusion (GO-LIF) [J]. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2010(11):199.
- [9] Roy-Camille R, Saillant G, Mazel C. Internal fixation of the lumbar spine with pedicle screw plating[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1986(203):7-17.
- [10] Akesen B, Wu C, Mehbod AA, et al. Biomechanical evaluation of paracoccygeal transsacral fixation[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2008, 21(1):39-44.
- [11] St Clair S, Tan JS, Lieberman I. Oblique lumbar interbody fixation:a biomechanical study in human spines[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2012, 25(4):183-189.
- [12] Minamide A, Akamaru T, Yoon ST, et al. TransdiscaL L₅-S₁ screws for the fixation of isthmic spondylolisthesis: a biomechanical evaluation[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2003, 16(2):144-149.
- [13] Totoribe K, Chosa E, Tajima N. A biomechanical study of lumbar fusion based on a three-dimensional nonlinear finite element method [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2004, 17(2):147-153.
- [14] Erulkar JS, Grauer JN, Patel TC, et al. Flexibility analysis of posterolateral fusions in a New Zealand white rabbit model[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2001, 26(10):1125-1130.
- [15] Lowe TG, Tahernia AD, O'Brien MF, et al. Unilateral transforaminal posterior lumbar interbody fusion (TLIF): indications, technique, and 2-year results[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2002, 15(1):31-38.
- [16] Moore KR, Pinto MR, Butler LM. Degenerative disc disease treated with combined anterior and posterior arthrodesis and posterior instrumentation[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2002, 27(15):1680-1686.
- [17] 宋西正,王文军,薛静波,等.经皮椎弓根螺钉内固定联合骶前间隙轴向椎间融合治疗L₅椎体滑脱症[J].中国脊柱脊髓杂志,2014,24(5):407-411.
- [18] Tribus CB, Belanger T. The vascular anatomy anterior to the L₅-S₁ disk space[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2001, 26(11):1205-1208.
- [19] Yuan PS, Day TF, Albert TJ, et al. Anatomy of the percutaneous presacral space for a novel fusion technique[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2006, 19(4):237-241.
- [20] Lindley EM, McCullough MA, Burger EL, et al. Complications of axial lumbar interbody fusion[J]. *J Neurosurg Spine*, 2011, 15(3):273-279.

(收稿日期:2015-10-15)

(本文编辑 于倩)