

文章编号:1004-7220(2016)01-0083-06

颈椎体内运动的生物力学研究

毛海青^{1,2}, 钟伟业^{1,3}, 李国安¹

(1. Bioengineering Laboratory, Department of Orthopedic Surgery, Massachusetts General Hospital/Harvard Medical School, Boston 02114, USA;

2. 苏州大学附属第一医院 骨科, 苏州 215000; 3. 中南大学 湘雅二医院, 脊柱外科, 长沙 410011)

摘要: 由于技术水平的限制,传统的体外生物力学研究方法无法完全模拟人体内真实环境。颈椎体内运动的生物力学研究利用先进的影像技术和检测方法,能够直接观测体内颈椎的运动状态,所获得的数据更接近真实情况,对临床具有重要的参考价值和指导意义。介绍颈椎体内运动的生物力学研究方法、发展过程及目前颈椎体内运动的研究现状,分析颈椎融合手术和颈椎间盘置换术后颈椎运动的改变以及手术对邻近节段的影响,并对今后的发展方向进行探讨。

关键词: 颈椎; 邻近节段退变; 体内运动学; 生物力学

中图分类号: R318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.3871/j.1004-7220.2016.01.083

In vivo biomechanical study of cervical spine kinematics

MAO Hai-qing^{1,2}, ZHONG Wei-ye^{1,3}, LI Guo-an¹ (1. *Bioengineering Laboratory, Department of Orthopedic Surgery, Massachusetts General Hospital/Harvard Medical School, Boston 02114, USA;* 2. *Department of Orthopedic Surgery, First Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou 215000, Jiangsu, China;* 3. *Department of Spinal Surgery, Second Xiangya Hospital of Central South University, Changsha 410011, China*)

Abstract: The traditional method of *in vitro* biomechanical study cannot simulate the realistic environment in human body due to the limitation of *in vitro* technology. Using advanced imaging techniques and testing methods, *in vivo* biomechanical studies of cervical spine kinematics can directly observe the cervical spine motion of living subjects. The data obtain repeats physiological situations and has important implications for improvement in clinical practice. In this paper, the biomechanical research methods of cervical spine kinematics, as well as the development process and current status were reviewed. The postoperative changes in cervical spine kinematics and the effects on adjacent segments following cervical spine fusion and cervical disc arthroplasty surgery were analyzed. The future developments in cervical spine research were also discussed.

Key words: Cervical spine; Adjacent segment degeneration; *In vivo* kinematics; Biomechanics

颈椎连接枕骨与胸椎,具有与其他脊柱节段不同的解剖特点,是整个脊柱中体积最小、活动范围最大的节段。颈椎的退行性改变压迫脊髓和神经根产生临床症状导致颈椎病。前路颈椎间盘切除椎间融合手术 (anterior cervical discectomy and fusion,

ACDF)是治疗颈椎病的有效手段^[1],但手术同时会减少颈椎的有效运动节段,增加邻近节段活动度。颈椎间盘置换术 (cervical disc arthroplasty, CDA)能够保留手术节段的运动能力^[2],但临床上对其能否恢复正常颈椎运动、防止邻近节段退变仍存在争议^[3-5]。深入了解正常和退变颈椎的运动情况以及

收稿日期:2014-10-27; 修回日期:2014-11-01

通信作者:李国安,教授, E-mail:gli1@mgh.harvard.edu。

手术给颈椎运动带来的改变,可以为临床有效治疗颈椎病提供参考。由于技术水平的限制,采用诸如有限元分析和生物力学测试等传统生物力学研究方法无法完全模拟人体内真实环境,实际数据仍需通过对生理负荷状态下颈椎体内运动过程的直接测量获取。

1 颈椎体内运动的生物力学研究方法

以往对颈椎体内运动学的研究数据多通过测量屈曲或后伸位的颈椎 X 片获得^[6-7],但这只是对处于极端位置的颈椎的静态测量,并不能准确反映其实际运动情况,同时该方法也无法提供颈椎运动中期的信息,而这正是颈椎大部分日常活动所处的位置^[8]。因此,通过静态、二维测量所获得的研究结果并不能反映生理状态下颈椎活动的真实情况。

随着影像技术的发展,一些学者采用高频 X 线连续进行颈椎侧位透视,试图通过记录颈椎屈伸活动的整个过程弥补上述研究的不足^[9-11]。由于人体活动是三维立体的动态过程,这种影像追踪技术只能记录颈椎矢状面的运动,无法收集颈椎矢状面以外的活动数据,因而也不能全面反映真实的颈椎活动情况。另外有研究者使用 CT 或 MRI 技术分析颈椎活动,虽然可以得到颈椎在不同位置的三维立体影像,但由于技术限制,这些影像只能反映颈椎在静止状态下处于不同位置时的情况,仍然无法得到颈椎运动状态下的三维影像数据^[12-16]。其他一些技术例如光学追踪^[17-18]和电磁追踪^[19-21]也被应用于颈椎运动的研究。虽然这些技术能够动态追踪颈椎的立体运动,但是由于探测设备固定于人体表面,皮肤和骨骼的相对运动会影响数据的准确性,并且只能测量整个颈椎运动的数据,无法测量每个椎体的运动状态以及椎体之间相对运动情况,因而也未能得到广泛应用。

为了达到高精度实时记录脊柱三维动态活动的目的,Anderst 等^[22]将直径为 1.6 或 2.0 mm 的钛珠植入研究对象椎体和棘突内,采用动态放射立体测量分析(radiostereometric analysis, RSA)技术观测椎体融合术后腰椎运动改变情况。虽然这种研究方法在记录腰椎动态活动时可以达到 ± 0.18 mm 的精确度,但由于需要将异物植入观察对象的体内,如果直接应用于人体研究将会遇到难以逾越的伦理问题。

Wang 等^[23]在基于模型的三维匹配技术成功应用于膝关节体内运动研究的基础上^[24-25],将其应用于腰椎体内三维运动的研究。该技术首先对研究对象的腰椎进行 MRI 薄层扫描,然后重建三维模型。同时,研究对象在互相垂直的双 X 透视成像系统内进行生理负荷状态下的腰椎活动,包括屈曲、后伸、左右侧屈和左右旋转运动。高速 X 线透视成像系统记录运动全程中每个脊柱位置在两个不同角度下的二维影像。然后,在计算机内重建双 X 透视系统,将脊柱透视影像与三维模型导入计算机内,调整模型中每个椎体位置,使之与实际透视的影像相匹配,以此确定各椎体在特定活动状态下的相对位置。研究表明,在不需要有创操作的情况下,采用这种方法记录腰椎三维运动可达 ± 0.3 mm 和 $\pm 0.7^\circ$ 的精确度,完全能够满足研究的需要。

在此基础上,Medonald 等^[26]将三维匹配技术^[23]和追踪技术^[27]相结合应用于颈椎体内三维运动学的研究。该技术将 CT 扫描重建的三维颈椎模型导入到计算机模拟的双 X 线透视系统内,模拟 X 线穿过三维模型生成数字重建 X 片。计算机自动分析每个椎体在每个位置上两张数字重建 X 片与实际双 X 透视得到 X 片的相关程度,由此决定三维模型中各个椎体在不同运动状态下的位置和方向。这一技术在研究颈椎体内三维动态运动时可以达到 ± 0.56 mm 和 $\pm 0.61^\circ$ 的精确度。Anderst 等^[28-29]采用相同方法验证了该技术测量正常颈椎和接受单节段融合手术病人颈椎三维运动的准确性和可靠性,认为三维追踪技术在不需要金属植入物的情况下测量生理状态下的颈椎三维运动可以达到亚毫米级的精确度,而且不受融合手术植入的内植物的影响。

2 颈椎体内运动的特点

MRI 技术很早就被用以测量正常和退变颈椎在体内的运动情况。Ishii 等^[12]采集 10 名健康志愿者颈椎旋转过程中 11 个位置的三维 MRI 影像,每个位置间隔 15° 。该研究发现,C2/3、C6/7 和 C7/T1 轴向旋转的角度明显小于其他 3 个节段,和之前报道的体外研究^[30]结果相似。与上颈椎旋转伴随相反的侧屈方向不同^[13],当下颈椎旋转时伴随的侧屈方向与旋转方向相同。无论轴向旋转的方向如何,均伴有 C2/3、C3/4 和 C4/5 的后伸以及 C5/6、

C6/7和 C7/T1 的屈曲。应用相同的技术, Ishii 等^[14]发现,当上颈椎侧屈时伴有与侧屈方向相反的轴向旋转,而下颈椎侧屈方向和伴随的轴向旋转方向相同。Lin 等^[31]采用三维技术观测直立运动状态的下颈椎活动,结果发现下颈椎各节段的旋转角度均接近或低于 Ishii 等^[14]在颈椎仰卧静止状态下测量结果,而运动状态下的颈椎侧屈角度明显大于静止状态的颈椎。Nagamoto 等^[15]观察 15 名有症状的颈椎退变患者的颈椎运动变化,与无症状对照组相比,下颈椎活动度明显减少,特别是 C5/6 和 C6/7 轴向旋转和伴随的侧屈角度均显著减少,而 C2/3 和 C3/4 旋转时伴随的侧屈角度却明显增加。

Wu 等^[11]采用动态二维影像技术分析 48 名健康成人颈椎屈伸活动,结果显示在颈椎初始 1/3 屈曲活动阶段,C4/5 和 C3/4 对整个颈椎(C2~7)屈曲活动贡献度较大,而在屈曲活动的中 1/3 阶段,C5/6 和 C6/7 的贡献度较大,而后 1/3 阶段 C6/7 最为突出。颈椎后伸前 1/3 阶段,C5/6 活动最为突出,在中 1/3 阶段,C5/6 和 C4/5 的贡献度较大,后 1/3 阶段则是 C4/5 和 C3/4 对整个颈椎后伸的贡献度较大。Anderst 等^[32]采用三维追踪技术分析了 18 名无症状的成人颈椎活动后发现,C4/5 和 C3/4 节段在颈椎活动中期达到对整个颈椎(C2~7)屈伸活动的最大贡献度,而 C5/6 和 C6/7 则在接近屈伸活动起点和终点时贡献度最大。

3 ACDF 对邻近节段的影响

ACDF 术后邻近节段发生退行性改变一直是临床关注的重要问题^[5,33-35]。通常认为颈椎融合手术消除了融合节段的活动,导致邻近节段代偿性活动增加,这种运动学和生物力学改变导致邻近非融合节段发生退变。有限元分析和体外生物力学研究证实,融合手术增加了邻近节段的活动度(range of motion, ROM),改变其旋转中心(center of rotation, COR),增加邻近椎间盘的压力和关节突关节的负荷^[36-37],这些改变均可能导致邻近节段发生退变。

Bell 等^[20]运用电磁追踪技术观察 ACDF 手术前后颈椎 ROM 变化。与正常对照组相比,颈椎 ROM 随着 ACDF 手术节段数量的增加而减少。与术前相比,单节段融合病人颈椎 ROM 在术后逐渐增加,至术后 150 d 达到正常对照组水平。双节段

融合病人术后颈椎 ROM 高于术前,但 150 d 后呈下降趋势。Bechara 等^[21]用相同的方法观测到多节段融合患者 ROM 显著低于正常对照组,5 节段融合患者颈椎 ROM 较 4 节段融合患者更低。

Anderst 等^[32-38]采用三维追踪技术比较 C5/6 融合病人与正常人颈椎动态屈伸活动差异。研究发现,C5/6 融合不会改变邻近节段总的 ROM,但是会使上、下邻近节段的后伸 ROM 增大(3.8°),上位节段屈曲活动减少(-2.9°),也使邻近节段在活动过程中向后移位程度增加(C4/5:0.8 mm, C6/7:0.4 mm)。C5/6 融合后,邻近手术节段的 C4/5 对术后整个颈椎屈伸活动的贡献度平均增加 5.1%,C6/7 的贡献度增加达 8.9%,C2/3 和 C3/4 的贡献度无显著改变。作者认为,C5/6 融合术后 C6/7 比 C4/5 更容易发生退变。

但是,也有学者认为邻近节段退变并非手术所致,可能只是颈椎病的自然病史过程。Song 等^[39]分析了 87 例单节段颈椎前路融合手术临床随访 5 年以上的病人,发现术后邻近和非邻近节段出现临床症状的发生率并没有显著差异。Hilibrand 等^[33]发现,多节段融合手术病人邻近节段出现症状的发生率显著低于单节段融合手术的患者。这一临床发现与通常认为单节段融合术后邻近节段的应力低于多节段融合术后邻近节段应力的观点相矛盾,促使研究者重新审视融合手术导致邻近节段退变的认识是否正确。

4 CAD 术后颈椎运动的改变

CDA 理论上可以保留手术节段 ROM,预防或减少邻近节段退变。体外生物力学研究也证实,CAD 能够将手术和邻近节段的 ROM 部分或者完全地恢复到近似于正常的水平^[40-41]。CDA 术后体内颈椎运动改变的数据多通过测量颈椎侧位 X 片取得,临床报道结果并不一致。Rabin 等^[42]报道 CDA 术后 2 年手术节段 ROM 大于 ACDF 患者,但两种手术后邻近节段 ROM 无明显差异。Hou 等^[43]报告接受 ACDF 手术的患者术后邻近节段 ROM 明显高于 CDA 组。Anderson 等^[44]对研究 ACDF 和 CDA 术后邻近节段运动改变的临床报告进行系统回顾和 Meta 分析,包括 7 项随机对照研究,4 项队列研究和 1 项病例对照研究。随访 2 年后发现两组病人手术邻近

节段屈伸 ROM 和冠矢状面移位程度均无显著差异,但术后 1~2 年 CDA 组病人手术邻近节段在矢状面上的前凸角度要明显大于 ACDF 组。

McDonald 等^[45]采用三维追踪技术对比分析 ACDF 和 CDA 病人术后颈椎运动差异。该研究纳入 10 名 C5/6 接受 ACDF 手术和 7 名相同节段接受 CDA 手术的患者,研究节段包括 C3~7 整个下颈椎。结果显示,ACDF 和 CDA 两组病人术后整个下颈椎后伸和旋转活动没有显著差异,但是 ACDF 组非手术节段 C3/4 和 C6/7 在后伸运动时 ROM 明显高于 CDA 组。ACDF 病人关节突关节的内外侧滑移程度在颈椎后伸活动时也显著高于 CDA 组,特别是在 C3/4 和 C4/5 两个节段。这些结果表明,ACDF 术后邻近未手术节段 ROM 与 CDA 相比明显增加,但不能确定这种改变是否导致邻近节段退变。

颈椎手术后邻近节段退变是多因素作用的结果。大量研究表明,CDA 并不比 ACDF 在预防邻近节段退变方面更具有优势。Verma 等^[46]对 6 项随访时间 2 年以上的前瞻性临床研究进行 Meta 分析后发现,ACDF 和 CDA 两组病人邻近节段疾病发生率没有显著差异。Ren 等^[4]对 5 项美国食品药品监督管理局批准的临床随机对照研究资料进行 Meta 分析的结果也支持这一结论。但这份随访时间为 4~6 年的中长期报告同时指出,与 ACDF 相比,CDA 能降低再手术率和获得更好的功能恢复。

5 展望

颈椎是整个脊柱运动范围最大、运动过程最复杂的节段,加之个体差异显著,研究者对正常颈椎运动的认知尚不全面,对退变后的颈椎活动、颈椎融合手术和颈椎间盘置换手术对邻近节段以及整个颈椎运动的影响及其后果也不明确,目前还鲜有对比术前术后颈椎节段三维运动变化的研究报告。作为组成脊柱功能单位主要结构的椎间盘,对其在体内的形变及应力分析也鲜有报道。

影像技术的发展和研究方法的改进使得在无创条件下高精度记录和分析颈椎体内三维运动成为可能。与传统的生物力学研究方法不同,三维匹配技术和追踪技术能准确地记录和分析生理负荷下颈椎动态三维运动,并且随着技术的发展,有可能进一步

探究椎间盘在体内的应力、应变状态以及椎间盘退变的生物力学改变。这些更接近真实情况的数据有助于更加深入地了解颈椎体内运动的情况、手术后颈椎运动的变化以及椎间盘退变的状态,对指导临床实践、减少手术干预对正常颈椎活动的影响,以及研发更接近实际生理活动的弹性融合技术和颈椎间盘假体、造福众多晚期颈椎病患者等都具有重要意义。

参考文献:

- [1] Emery SE, Bohlman HH, Bolesta MJ, *et al.* Anterior cervical decompression and arthrodesis for the treatment of cervical spondylotic myelopathy. Two to seventeen-year follow-up [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1998, 80(7): 941-951.
- [2] Goffin J, Van Calenbergh F, Van Loon J, *et al.* Intermediate follow-up after treatment of degenerative disc disease with the Bryan cervical disc prosthesis: Single-level and bi-level [J]. *Spine*, 2003, 28(24): 2673-2678.
- [3] Alvin MD, Abbott EE, Lubelski D, *et al.* Cervical arthroplasty: A critical review of the literature [J]. *Spine J*, 2014, 14(9): 2231-2245.
- [4] Ren C, Song Y, Xue Y, *et al.* Mid- to long-term outcomes after cervical disc arthroplasty compared with anterior discectomy and fusion: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Eur Spine J*, 2014, 23(5): 1115-1123.
- [5] Bydon M, Xu R, Macki M, *et al.* Adjacent segment disease after anterior cervical discectomy and fusion in a large series [J]. *Neurosurgery*, 2014, 74(2): 139-146.
- [6] Dvorak J, Panjabi MM, Novotny JE, *et al.* *In vivo* flexion/extension of the normal cervical spine [J]. *J Orthop Res*, 1991, 9(6): 828-834.
- [7] Frobin W, Leivseth G, Biggemann M, *et al.* Sagittal plane segmental motion of the cervical spine. A new precision measurement protocol and normal motion data of healthy adults [J]. *Clin Biomech*, 2002, 17(1): 21-31.
- [8] Bible JE, Biswas D, Miller CP, *et al.* Normal functional range of motion of the cervical spine during 15 activities of daily living [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2010, 23(1): 15-21.
- [9] Reitman CA, Hipp JA, Nguyen L, *et al.* Changes in segmental intervertebral motion adjacent to cervical arthrodesis: A prospective study [J]. *Spine*, 2004, 29(11): E221-226.
- [10] Liu F, Cheng J, Komistek RD, *et al.* *In vivo* evaluation of dynamic characteristics of the normal, fused, and disc

- replacement cervical spines [J]. *Spine*, 2007, 32(23): 2578-2584.
- [11] Wu SK, Kuo LC, Lan HC, et al. Segmental percentage contributions of cervical spine during different motion ranges of flexion and extension [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2010, 23(4): 278-284.
- [12] Ishii T, Mukai Y, Hosono N, et al. Kinematics of the subaxial cervical spine in rotation *in vivo* three-dimensional analysis [J]. *Spine*, 2004, 29(24): 2826-2831.
- [13] Ishii T, Mukai Y, Hosono N, et al. Kinematics of the upper cervical spine in rotation: *In vivo* three-dimensional analysis [J]. *Spine*, 2004, 29(7): E139-144.
- [14] Ishii T, Mukai Y, Hosono N, et al. Kinematics of the cervical spine in lateral bending: *In vivo* three-dimensional analysis [J]. *Spine*, 2006, 31(2): 155-160.
- [15] Nagamoto Y, Ishii T, Sakaura H, et al. *In vivo* three-dimensional kinematics of the cervical spine during head rotation in patients with cervical spondylosis [J]. *Spine*, 2011, 36(10): 778-783.
- [16] Nagamoto Y, Iwasaki M, Sugiura T, et al. *In vivo* 3D kinematic changes in the cervical spine after laminoplasty for cervical spondylotic myelopathy [J]. *J Neurosurg Spine*, 2014, 21(3): 417-424.
- [17] Ferrario VF, Sforza C, Serrao G, et al. Active range of motion of the head and cervical spine: A three-dimensional investigation in healthy young adults [J]. *J Orthop Res*, 2002, 20(1): 122-129.
- [18] Lee JH, Kim JS, Lee JH, et al. Comparison of cervical kinematics between patients with cervical artificial disc replacement and anterior cervical discectomy and fusion for cervical disc herniation [J]. *Spine J*, 2014, 14(7): 1199-1204.
- [19] Bell KM, Frazier EC, Shively C M, et al. Assessing range of motion to evaluate the adverse effects of ill-fitting cervical orthoses [J]. *Spine J*, 2009, 9(3): 225-231.
- [20] Bell KM, Bechara BP, Hartman RA, et al. Influence of number of operated levels and postoperative time on active range of motion following anterior cervical decompression and fusion procedures [J]. *Spine*, 2011, 36(4): 263-268.
- [21] Bechara BP, Bell KM, Hartman RA, et al. *In vivo* analysis of cervical range of motion after 4- and 5-level subaxial cervical spine fusion [J]. *Spine*, 2012, 37(1): E23-29.
- [22] Anderst WJ, Vaidya R, Tashman S. A technique to measure three-dimensional *in vivo* rotation of fused and adjacent lumbar vertebrae [J]. *Spine J*, 2008, 8(6): 991-997.
- [23] Wang S, Passias P, Li G, et al. Measurement of vertebral kinematics using noninvasive image matching method-validation and application [J]. *Spine*, 2008, 33(11): E355-361.
- [24] Li G, DeFrate LE, Park SE, et al. *In vivo* articular cartilage contact kinematics of the knee: An investigation using dual-orthogonal fluoroscopy and magnetic resonance image-based computer models [J]. *Am J Sports Med*, 2005, 33(1): 102-107.
- [25] Hanson GR, Suggs JF, Freiberg AA, et al. Investigation of *in vivo* 6DOF total knee arthroplasty kinematics using a dual orthogonal fluoroscopic system [J]. *J Orthop Res*, 2006, 24(5): 974-981.
- [26] McDonald CP, Bachison CC, Chang V, et al. Three-dimensional dynamic *in vivo* motion of the cervical spine: Assessment of measurement accuracy and preliminary findings [J]. *Spine J*, 2010, 10(6): 497-504.
- [27] Bey MJ, Zuel R, Brock SK, et al. Validation of a new model-based tracking technique for measuring three-dimensional, *in vivo* glenohumeral joint kinematics [J]. *J Biomech Eng*, 2006, 128(4): 604-609.
- [28] Anderst WJ, Baillargeon E, Donaldson WF 3rd, et al. Validation of a noninvasive technique to precisely measure *in vivo* three-dimensional cervical spine movement [J]. *Spine*, 2011, 36(6): E393-400.
- [29] Baillargeon E, Anderst WJ. Sensitivity, reliability and accuracy of the instant center of rotation calculation in the cervical spine during *in vivo* dynamic flexion-extension [J]. *J Biomech*, 2013, 46(4): 670-676.
- [30] Panjabi MM, Crisco JJ, Vasavada A, et al. Mechanical properties of the human cervical spine as shown by three-dimensional load-displacement curves [J]. *Spine*, 2001, 26(24): 2692-2700.
- [31] Lin CC, Lu TW, Wang TM, et al. *In vivo* three-dimensional intervertebral kinematics of the subaxial cervical spine during seated axial rotation and lateral bending via a fluoroscopy-to-CT registration approach [J]. *J Biomech*, 2014, 47(13): 3310-3317.
- [32] Anderst WJ, Donaldson WF 3rd, Lee JY, et al. Cervical motion segment percent contributions to flexion-extension during continuous functional movement in control subjects and arthrodesis patients [J]. *Spine*, 2013, 38(9): E533-539.
- [33] Hilibrand AS, Carlson GD, Palumbo MA, et al. Radiculopathy and myelopathy at segments adjacent to the site of a previous anterior cervical arthrodesis [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1999, 81(4): 519-528.
- [34] Kulkarni V, Rajshekhar V, Raghuram L. Accelerated spondylotic changes adjacent to the fused segment following central cervical corpectomy: Magnetic resonance imaging study evidence [J]. *J Neurosurg*, 2004, 100(1 Suppl Spine): 2-6.

- [35] Nunley PD, Jawahar A, Kerr EJ 3rd, *et al.* Factors affecting the incidence of symptomatic adjacent-level disease in cervical spine after total disc arthroplasty: 2- to 4-year follow-up of 3 prospective randomized trials [J]. *Spine*, 2012, 37(6): 445-451.
- [36] Eck JC, Humphreys SC, Lim TH, *et al.* Biomechanical study on the effect of cervical spine fusion on adjacent-level intradiscal pressure and segmental motion [J]. *Spine*, 2002, 27(22): 2431-2434.
- [37] Hussain M, Nassr A, Natarajan RN, *et al.* Biomechanics of adjacent segments after a multilevel cervical corpectomy using anterior, posterior, and combined anterior-posterior instrumentation techniques: A finite element model study [J]. *Spine J*, 2013, 13(6): 689-696.
- [38] Anderst WJ, Lee JY, Donaldson WF 3rd, *et al.* Six-degrees-of-freedom cervical spine range of motion during dynamic flexion-extension after single-level anterior arthrodesis: Comparison with asymptomatic control subjects [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2013, 95(6): 497-506.
- [39] Song KJ, Choi BW, Jeon TS, *et al.* Adjacent segment degenerative disease: is it due to disease progression or a fusion-associated phenomenon? Comparison between segments adjacent to the fused and non-fused segments [J]. *Eur Spine J*, 2011, 20(11): 1940-1945.
- [40] Puttlitz CM, Rousseau MA, Xu Z, *et al.* Intervertebral disc replacement maintains cervical spine kinetics [J]. *Spine*, 2004, 29(24): 2809-2814.
- [41] Galbusera F, Bellini CM, Brayda-Bruno M, *et al.* Biomechanical studies on cervical total disc arthroplasty: A literature review [J]. *Clin Biomech*, 2008, 23(9): 1095-1104.
- [42] Rabin D, Pickett GE, Bisnaire L, *et al.* The kinematics of anterior cervical discectomy and fusion versus artificial cervical disc: A pilot study [J]. *Neurosurgery*, 2007, 61(3 Suppl): 100-104.
- [43] Hou Y, Liu Y, Yuan W, *et al.* Cervical kinematics and radiological changes after discover artificial disc replacement versus fusion [J]. *Spine J*, 2014, 14(6): 867-877.
- [44] Anderson PA, Sasso RC, Hipp J, *et al.* Kinematics of the cervical adjacent segments after disc arthroplasty compared with anterior discectomy and fusion: A systematic review and meta-analysis [J]. *Spine*, 2012, 37(22 Suppl): S85-95.
- [45] McDonald CP, Chang V, McDonald M, *et al.* Three-dimensional motion analysis of the cervical spine for comparison of anterior cervical decompression and fusion versus artificial disc replacement in 17 patients [J]. *J Neurosurg Spine*, 2014, 20(3): 245-255.
- [46] Verma K, Gandhi SD, Maltenfort M, *et al.* Rate of adjacent segment disease in cervical disc arthroplasty versus single-level fusion: Meta-analysis of prospective studies [J]. *Spine*, 2013, 38(26): 2253-2257.