

颅颈交界区畸形寰枢外侧关节生物力学稳定性的有限元分析*

杨明浩,高文雷,金乾坤,陆 声[△]
(成都军区昆明总医院骨科,昆明 650032)

[摘要] **目的** 利用有限元法分析颅颈交界区畸形(CJVM)寰枢椎外侧关节生物力学变化。**方法** 获取 1 例 CJVM 枕骨和颈椎的 CT 扫描图像,利用三维造型和有限元软件建立颅颈交界区的三维有限元模型。施加生理载荷和边界条件,通过比较该模型与正常模型活动度的差异结合临床观察经验,验证模型的有效性,同时分析寰枢椎外侧关节应力分布。**结果** 建立几何精度较高和参数设定可靠的 CJVM 有限元模型,通过模型发现各节段的活动度与相关尸体实验和有限元模型数据的结果相比总体呈微小趋势,与一般 CJVM 患者临床实际运动表现相符合。获得了不同生理状况下畸形有限元模型寰枢椎外侧关节面的应力分布情况,可以合理解释寰枢椎外侧关节结构变异及其在维持寰枢椎之间稳定的重要作用。**结论** CJVM 患者寰枢椎外侧关节结构发生变异,其生物力学稳定性对于术前的诊断和术中治疗操作具有一定价值。

[关键词] 颅颈交界区畸形;关节;生物力学;有限元分析

[中图分类号] R687.3

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-8348(2015)29-4070-03

Biomechanical of lateral atlantoaxial articulation in craniocervical junction malformation: a finite element analysis*

Yang Minghao, Gao Wenlei, Jin Qiankun, Lu Sheng[△]

(Department of Orthopaedics, Kunming General Hospital of Chengdu Military Command of PLA, Kunming, Yunnan 650032, China)

[Abstract] **Objective** To analyze the biomechanical changes of lateral atlantoaxial articulation by means of three-dimensional finite element models of craniocervical junction malformation(CJVM). **Methods** CT scan images of 1 patients with CJVM were obtained. The analytical model was constructed by advanced three-dimension modeling and finite element softwares. A comparison of range of motion difference between the deformity model and normal model, referring to the experience of clinical observation, was used to verify the validity of the model. Applying respectively the same loads and boundary conditions on finite element model. The effectiveness was verified by contrastive analysis of the variation in lateral atlantoaxial joint stresses. **Results** The finite CJVM element model with high geometric accuracy and reliable parameter had built. Compared to the results of cadaver test and finite element model based in normal cranio-cervical junction, the segment mobility coincides with the actual clinical performance in patients. The stress distribution the lateral junction between atlas and axis of can be reasonably explained the deformation of lateral atlanto-axial joint structure and its important role in remaining stable between atlantoaxial vertebrae under different physiological conditions. **Conclusion** The structure of lateral atlantoaxial joint changes in patients of CJVM, the biomechanical stability for preoperative diagnosis and intraoperative treatment operation has a certain value.

[Key words] craniocervical junction malformation; joints; biomechanics; finite element analysis

颅颈交界区畸形(CJVM)是指枕骨大孔区和寰枢椎的骨、神经和软组织发育异常,包括颅底凹陷、寰枢脱位等畸形,常导致延髓压迫而出现进行性的神经受损症状,手术治疗风险高、难度大。寰枢椎外侧关节的结构变异是 CJVM 的重要畸形特征,其骨性和关节形态的异常影响寰枢椎稳定性。近年来,有限元法在上颈椎生物力学领域的应用越来越广泛,对于畸形或不稳上颈椎有限元模型的建立,大多数所建模型基于健康的上颈椎影像数据,而对根据患者数据建立有限元模型的研究和临床报道文献较少。本文旨在直接建立基于 CJVM 患者的有限元模型,测试畸形寰枢椎外侧关节在前屈、后伸、侧弯、旋转工况下的应力响应,以期为临床治疗提供参考。

1 资料与方法

1.1 CJVM 有限元模型的建立 选取 CJVM 病例 1 例,女,40 岁,行枕颈 X 线、CT 三维重建和 MRI 检查确诊为先天性 CJVM 伴寰枢椎脱位、寰枕融合和 C2/C3 融合。CT 扫描条件:电压为 120 kV,层厚为 0.625 mm,距阵为 512×512。获取从颅底至颈椎的 CT 图像,将扫描的 Dicom 格式数据导入 Mim-

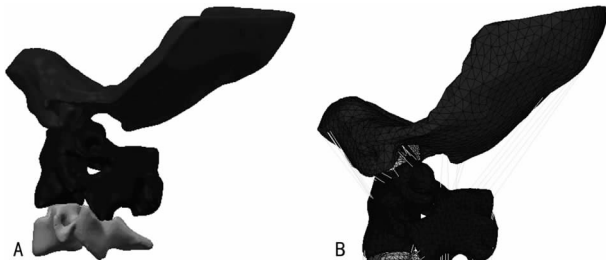
ics 15.0 软件(Materialise 公司,比利时),对颅底至 C4 椎骨进行图像处理并三维重建,生产各部分独立的骨骼模型。将重建好的骨骼模型以 PointCloud 格式输入 SolidWorks 2014 软件(Dassault Systemes 公司,法国)中进一步建立实体模型,然后将修整好的模型导入 HyperMesh 12.0 软件(Altair 公司,美国),对其进行划分实体网格,按照解剖部位和形态补充建立椎间盘、关节软骨以及韧带等结构,并进行定义单元属性,赋予材质,设定接触等,获得三维有限元模型。最后将其导入 ABAQUS 6.13 软件(Dassault Systemes 公司,法国)中,施加边界条件和载荷后运算,并进行分析统计结果等后处理。

1.2 韧带重建和接触关系 本模型定义的韧带有关节:前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、寰枢关节囊韧带、C3/C4 关节囊韧带、棘间韧带、项韧带、翼状韧带、十字韧带(横韧带和纵束)、齿突尖韧带。由于该患者寰枕融合、C2/C3 融合,故省略此处相关韧带的建立,其他韧带的起止点和横截面积部分从相关有限元分析文献中获得,部分根据临床解剖和实验数据得到,韧带总体构成和布置真实程度高。模型中的寰枢椎关节,齿状突和横韧带关

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(81171428)。作者简介:杨明浩(1974—),本科,主治医师,主要从事临床骨科方面的研究。

[△] 通讯作者, Tel: 13150754696; E-mail: drlusheng@163.com。

节,C3/C4 关节突关节的关节面都定义为滑动接触关系,摩擦系数为 0.1。



A:复位骨模型;B:畸形有限元网格模型。

图 1 CT 三维重建

表 1 模型材料属性及参数

组织	弹性模量(MPa)	泊松比	面积(mm ²)
骨性结构			
皮质骨	12 000.0	0.29	—
松质骨	450.0	0.29	—
关节			
关节软骨	1.0	0.30	—
椎间盘			
终板	500.0	0.40	—
纤维环	3.4	0.40	—
髓核	1.0	0.49	—
韧带			
前纵韧带	54.5	0.30	6.10
后纵韧带	20.0	0.30	5.40
黄韧带	1.5	0.30	50.10
寰枢关节囊韧带	20.0	0.30	8.00
枢椎 C4 关节囊韧带	20.0	0.30	8.00
棘间韧带	1.5	0.30	13.10
项韧带	20.0	0.30	46.60
翼状韧带	5.0	0.30	2.00
横韧带	10.0	0.30	3.60
齿突尖韧带	20.0	0.30	1.00
器械材料			
钛合金	1.13×10 ¹¹	0.25	—

—:本文未涉及。

1.3 划分网格和附材质 借助 HyperMesh 灵活性的网格划

分功能,先对模型整体进行网格划分,再对感兴趣的区域进行网格细化。皮质骨和松质骨分别使用 C3D6、C3D4 实体单元模拟。横韧带是非常坚韧的弹性组织,所以,也将其采用实体单元定义,其他韧带结构根据其功能都用 Truss 单元模拟,设置为只能承受拉伸载荷的属性,各韧带的材料参数根据相关文献和解剖比例设置。由于直接基于 CJVM 影像建立有限元模型较少,本研究将参考健康人的组织结构有限元模型^[1]赋值,各材料参数见表 1。

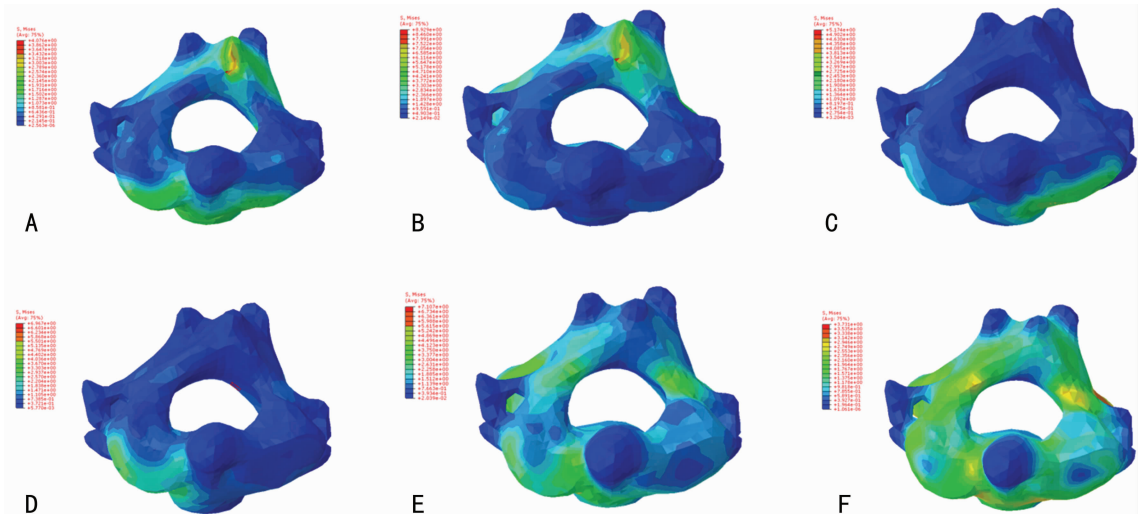
1.4 模型的约束和载荷及有效性说明 约束边界以 C4 下缘所有节点完全固定,其他部位不受约束。在枕骨底部上表面垂直向下均匀施加 40 N 的压力模拟头颅重量,同时在枕骨髁上均匀施加 1.5 N 的力矩,模拟前屈,后伸,侧弯和旋转运动。各节段的活动度和 Panjabi 等^[2]的体外尸体实验结果及 Lee 等^[3]、Zhang 等^[4]已建立的有限元模型进行比较角位移的活动范围(range of motion,ROM),若差异与临床观察相符合,即验证其有效性。

2 结 果

CJVM 有限元模型共包括 16 203 个节点、48 253 个单元。经后处理,C1~C2 节段的旋转活动度和 C3~C4 节段的前屈和后伸活动度明显降低,分别平均减小 50%和 77%,与 CVJM 临床实际运动表现相符合。所以,该有限元模型具有较高的准确性,可以根据不同的运动进行生物力学分析;ROM 验证结果见表 2。此外,如图 2、表 3 所示,通过模型在不同工况下寰枢椎外侧关节面 Von Mises 应力云图和最大值可以直接预测关节滑脱的趋势,提醒患者及时进行手术治疗。寰枢椎外侧关节面角度及三维形态见图 3,整个关节结构明显前倾,上关节面相对下关节面有部分滑脱,上关节面的下缘呈游离状态向前下发倾斜呈“唇状”(图 3)。

表 2 ROM 验证结果

加载方式	畸形模型	
	C1~C2	C3~C4
旋转	28.3	7.8
侧弯	4.3	2.7
前屈+后伸	22.3	2.0

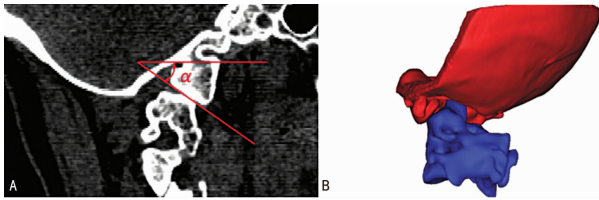


A:前屈;B:后伸 ;C:左侧弯;D:右侧弯;E:左旋转;F:右旋转。

图 2 6 个方向活动时融合椎上关节面应力分布

表 3 模型应力最大值 (MPa)

加载方式	畸形模型	复位模型
旋转	3.31	0.15
前屈	2.67	0.57
后伸	2.53	0.14
侧屈	2.73	0.32



A: 影像学图像; B: 三维重建模型。

图 3 寰枢椎外侧关节面角度及三维形态

3 讨论

CJVM 错综复杂,多种畸形常同时存在,关键病变是寰枢椎脱位造成的延颈髓受压,其发生发展受先天胚胎发育,后天病理生理学及生物力学变化因素影响。颅颈交界区的关节包括寰枕和寰枢椎外侧关节,寰齿关节和齿突横韧带(滑膜)关节。由于上颈椎不存在椎间盘,寰枢椎外侧关节作为主要的承重关节,对于维护该区域的稳定性至关重要。正常的寰枢椎外侧关节的关节面是平坦的,CJVM 引起的寰枕融合,颈椎分节及齿状突畸形等^[5],可能导致了外侧关节结构变异,但目前发病机制尚不清楚。有研究推测寰枢椎外侧关节面在对应枢椎关节面的滑脱加重影响了寰枢椎脱位和颅底凹陷^[6-7],但并未进一步系统性研究,这一观点对于先天性寰枢椎脱位的认识提供了新研究方向。刘策等^[8]研究发现寰枕融合时寰枢椎外侧关节常呈现不同程度的前倾和不对称,报道的 35 例中有 28 例双侧、3 例单侧寰枢椎下关节面前倾角大于 100°,存在不同程度的前后脱位等不同类型的脱位,判断寰枢椎外侧关节的几何形态变化可能是寰枢椎脱位的直接原因。文献的国外普通人群的寰枕融合发病率 0.08%~2.79%^[9-10],目前,尚未见国内相关发病率统计研究,按相同发病率分析,潜在的先天性寰枢椎不稳的患者将众多。寰枢椎外侧关节中形态改变导致的生物力学变化可以认为是导致寰枢椎脱位的发病因素之一,但目前基于 CJVM 寰枢椎的生物力学稳定性相关有限元分析,尚未见相关的有理论研究。

本研究模型在生理运动下的各节段的活动度与 Panjabi 等^[2]、Lee 等^[3]和 Zhang 等^[4]建立的模型数据的结果比较,总体呈偏小趋势,本研究表明 CJVM 合并 C0/C1 融合和 C2/C3 融合患者的 C1/C2 节段在旋转时,活动度减少明显,侧弯和前屈后伸时,活动度变化不大,患者临床也出现了颈部运动受限的症状,定量反映了关节融合对颅颈交界区活动度影响。从有限元的分析可以看出,在旋转状态下,侧块关节受到的应力最大,提示我们在采取 C1/2 固定时,一定要注意控制 C1/2 的旋转,才可以取得内固定的成功。健康人寰枢椎是轴向旋转运动突出,颈椎的 50%左右的旋转运动发生在 C1/C2 节段,C1/C2 侧块关节面在矢状面上为凸面,允许大幅旋转运动。根据尹一恒^[11]提出的 CJVM 寰枢椎外侧关节分型办法,通过测量本文患者的前倾角 α ,可以判断为 II 型,整个关节结构明显前倾,上关节面相对下关节面有部分滑脱,上关节面的下缘呈游离状态向前下发倾斜呈“唇状”(图 3),从而可以判断滑脱造成的寰枢椎关节错位是造成旋转明显下降的原因之一。横韧带是稳定并限制寰枢椎过度后伸的最重要结构,翼状韧带是限制其轴向旋转的重要结构。周定标等^[12]推测寰枢椎融合伴 C2/C3 融合时,

关节活动丧失,寰枢椎关节将承受更大的应力,并造成韧带拉长松弛,进而形成半脱位或脱位,但韧带拉长松弛后维持稳定的效果变差,与患者颈椎活动受限病证相反。本模型中韧带均参考正常解剖图谱和有限元模型设置,得出活动度值很好的验证了临床观察,所以,韧带软组织在缓慢的畸形病变中,由于齿突后移牵拉横韧带和翼状韧带等,产生代偿性增生变得刚度增大,从而一定程度上限制了寰枢椎关节的活动度。寰枢椎的融合椎的上关节面应力分布与关节的变异形态相关,具有明显的特征:其右侧关节滑脱较严重相,使前屈运动时右侧关节面应力分布较集中;寰枢椎的前倾角较大,造成左右侧弯时左右关节面的外侧应力分布集中,关节有继续滑脱的趋势;患者齿状突右偏斜畸形,在左右旋转运动时,齿状突右侧根部应力分布集中。本文只是反映了寰枢椎外侧关节面某一时刻的应力分布,通过有限元分析来获得一段时期的应力分布变化云图变化云图,则更具有价值,可以直接预测关节滑脱的趋势,根据颅颈交界区现有的承重方式,及时判断手术治疗的时间和优化手术治疗方法。骨作为脆性材料,如果只根据第一强度理论,考虑最大主应力不符合骨骼在生理下复杂受力状况,所以,采用基于第四强度理论,能够反映多方向应力的 Von Mises 应力提取最大值。目前尚未有关节面应力最大值,李青等^[13]认为寰枕融合畸形时,由于其丧失运动功能寰枕关节僵直,生理载荷从枕骨向下传导时,未经寰枕关节的缓冲,直接作用于寰枢椎,将产生应力增加。本文患者的寰枢椎脱位后,造成接触面积减少,急剧应力增加,寰枢椎处于不稳定状态。

CJVM 手术治疗的 2 个目的是解除压迫和重建稳定性。当齿状突向后明显突出时或腹侧存在骨性压迫时,后路减压会加大成角角度,加重病情进展而不能缓解症状,此时经口咽或经鼻入路齿状突或斜坡磨除减压,所以,减压解除压迫需要寰枢椎间的不稳状况有全面的把握。先天性寰枢椎脱位复杂,常发生多方位脱位,而目前各种影像学测量方法多用于观察齿状突尖部的位置如寰齿间距,能在一定程度上反映脱位程度和可复位情况。但对于合并旋转等复杂的畸形病变难以充分反映寰枢椎的情况。Salunke 等^[14]提出了经寰枢椎下关节面直线与经硬腭前上点与后缘的直线间的夹角, Yin 等^[15]提出的寰枢椎外侧关节的前倾角,都根据研究病例认为关节面形态分析可用于不稳寰枢椎可复位的诊断。寰枢椎外侧关节变异导致了颅颈交界区生物力学的变化,对分析复杂寰枢椎脱位在多维空间的状况有指导作用,为合理地计划手术方案提供依据。Jian 等^[16]采用枢椎椎弓根及枕骨螺钉间撑开直接进行复位,延髓脊髓减压良好。但外侧关节复位结构,有失稳的发展趋势。术中最终复位不仅要关注解除对延、颈髓的压迫和寰齿关节间距,还要注意对寰枢椎外侧关节的平衡结构的恢复,排除植骨融合后的不稳定因素。对于 CJVM 这类复杂疾病,不仅要确定畸形类型,还要分析受累节段的生物力学情况,指导临床采取更加合理和个性化的治疗方案。因为正常人 CJVM 病症千变万化,颅底交界区畸形有限元生物力学分析需要比健康人病症更多的样本数量来建模分析,探究出其致病的普遍规律。后续工作需要做好 CJVM 标本的收集,针对不同类型的畸形采样一定数量的标本,研究此病发生,发展和诊治的本质规律,以便进行其解剖学系统性的研究,提升建立畸形有限元模型时对结构形态和功能理解,设置更加准确参数。

参考文献

- [1] Cai X, Yu Y, Liu Z, et al. Three-dimensional finite element analysis of occipitocervical fixation using (下转第 4076 页)

参考文献

- [1] Gordon JW, Shaw JA, Kirshenbaum LA. Multiple facets of NF- κ B in the heart: to be or not to NF- κ B[J]. *Circ Res*, 2011, 108: 1122-1132.
- [2] Marcus AJ, Woodbury D. Fetal stem cells from extra-embryonic tissues Do not discard[J]. *J Cell Mol Med*, 2008, 12(3): 730-742.
- [3] Han HG, Wang ZW, Zhang NB, et al. Role of nitric oxide during early phase myocardial ischemic preconditioning in rats[J]. *Chin Med J (Engl)*, 2008, 121(13): 1210-1214.
- [4] Hofmann U, Frantz S. How can we cure a heart "in flame"? A translational view on inflammation in heart failure[J]. *Basic Res Cardiol*, 2013, 108(4): 356.
- [5] Varda-Bloom N, Leor J, Ohad DG, et al. Cytotoxic T lymphocytes are activated following myocardial infarction and can recognize and kill healthy myocytes in vitro[J]. *J Mol Cell Cardiol*, 2000, 32(12): 2141-2149.
- [6] Chan CJ, Smyth MJ, Martinet L. Molecular mechanisms of natural killer cell activation in response to cellular stress[J]. *Cell Death Differ*, 2014, 21(1): 5-14.
- [7] Lambert JM, Lopez EF, Lindsey ML. Macrophage roles following myocardial infarction[J]. *Int J Cardiol*, 2008, 130(2): 147-158.
- [8] Kubota T, Mctiernan CF, Frye CS, et al. Dilated cardiomyopathy in transgenic mice with cardiac-specific overexpression of tumor necrosis factor- α [J]. *Circ Res*, 1997, 81(4): 627-635.
- [9] Rordorf R, Savastano S, Sanzo A, et al. Tumor necrosis factor- α predicts response to cardiac resynchronization therapy in patients with chronic heart failure[J]. *Circ J*, 2014, 78(9): 2232-2239.
- [10] Michler RE. Stem cell therapy for heart failure[J]. *Cardiol Rev*, 2014, 22(3): 105-116.
- [11] Abumaree M, Al Jumah M, Pace RA, et al. Immunosuppressive properties of mesenchymal stem cells[J]. *Stem Cell Rev Reports*, 2012, 8(2): 375-392.
- [12] Nagamura-Inoue T, He H. Umbilical cord-derived mesenchymal stem cells: Their advantages and potential clinical utility[J]. *World J Stem Cells*, 2014, 6(2): 195-202.
- [13] Januzzi J, Richards AM, Panel IC. An international consensus statement regarding amino-terminal pro-B-type natriuretic peptide testing: The international NT-proBNP consensus panel-Introduction[J]. *Am J Cardiol*, 2008, 101(3A): 1A-2A.
- (收稿日期: 2015-04-25 修回日期: 2015-06-16)
-
- (上接第 4072 页)
- an anterior occiput-to-axis locking plate system: a pilot study[J]. *Spine J*, 2014, 14(8): 1399-1409.
- [2] 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.
- [3] Lee SH, Im YJ, Kim KT, et al. Comparison of cervical spine biomechanics after fixed-and mobile-core artificial disc replacement: a finite element analysis[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2011, 36(9): 700-708.
- [4] Zhang QH, Teo EC, Ng HW, et al. Finite element analysis of moment-rotation relationships for human cervical spine [J]. *J Biom*, 2006, 39(1): 189-193.
- [5] Lv CW, Lei W, Ma ZS, et al. Posterior rotating rod reduction strategy for irreducible atlantoaxial subluxations with congenital odontoid aplasia[J]. *Spine*, 2010, 35(23): 2064-2070.
- [6] Goel A. Treatment of basilar invagination by atlantoaxial joint distraction and direct lateral mass fixation [J]. *J Neuros Spine*, 2004, 1(3): 281-286.
- [7] Goel A. Progressive basilar invagination after transoral odontoidectomy: Treatment by atlantoaxial facet distraction and craniocervical realignment[J]. *Spine*, 2005, 30(18): 551-555.
- [8] 刘策, 周定标, 余新光, 等. 寰枕融合畸形患者寰枢侧块关节形态变化与寰枢椎脱位的三维特征[J]. *中华神经医学杂志*, 2009, 8(1): 57-60.
- [9] Menezes AH. Craniocervical junction database analysis: incidence, classification, presentation, and treatment algorithms[J]. *Childs Nervous System*, 2008, 24(10): 1101-1108.
- [10] Gholve PA, Hosalkar HS, Ricchetti ET, et al. Occipitalization of the atlas in children-Morphologic classification, associations, and clinical relevance[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2007, 89A(3): 571-578.
- [11] 尹一恒. 颅颈交界区畸形中寰枢外侧关节的结构变异与生物力学研究[D]. 北京: 中国人民解放军军医进修学院, 2012.
- [12] 周定标, 张远征, 余新光, 等. 自发性寰枢椎脱位(附 155 例报告)[J]. *中华神经外科杂志*, 2000, 16(5): 270-272.
- [13] 李青, 贾连顺, 陈雄生, 等. 寰枢枕骨化对枕颈部生物力学影响的实验研究[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2002, 20(6): 469-472.
- [14] Salunke P, Sharma M, Sodhi HBS, et al. Congenital atlantoaxial dislocation: a dynamic process and role of facets in irreducibility[J]. *J Neuros Spine*, 2011, 15(6): 678-685.
- [15] Yin Y, Yu X, Zhou D, et al. Three-dimensional configuration and morphometric analysis of the lateral atlantoaxial articulation in congenital anomaly with occipitalization of the atlas[J]. *Spine*, 2012, 37(3): 170-173.
- [16] Jian FZ, Chen Z, Wrede KH, et al. Direct posterior reduction and fixation for the treatment of basilar invagination with atlantoaxial dislocation [J]. *Neurosurgery*, 2010, 66(4): 678-687.
- (收稿日期: 2015-04-18 修回日期: 2015-07-26)