

. 实验研究 .

齿状突切除术后前路与后路 C1~C2 经关节螺钉内固定的生物力学分析

马生辉 冯 煜 管江衡 张志浩 卢锦江 谢天浩 宋 健 马廉亭

【摘要】目的 比较齿状突切除术后前路与后路 C1~C2 经关节螺钉内固定的生物力学特点,为临床选择前路与后路内固定治疗方案提供生物力学依据。**方法** 基于前期已构建的全颈椎有限元模型,进一步构建齿状突切除模型,继而在齿状突切除模型中分别构建前路 C1~C2 内固定模型及后路 C1~C2 内固定模型,在 ABAQUS 6.12.~1 软件中计算手术模型各个节段前屈-后伸、左右旋转及左右侧弯的活动度及内固定应力情况。**结果** 齿状突切除造成 C1~C2 节段前屈活动度增加幅度达 55%,后伸活动度增加 128.2%。前路与后路在 C1~C2 节段的内固定效果基本相同,均可明显限制 C1~C2 节段的活动度,使其处于相对固定的状态。前路及后路 C1~C2 内固定最大应力均位于前屈方向。**结论** 齿状突切除会明显降低 C1~C2 节段的稳定性,前路或后路 C1~C2 经关节螺钉内固定均可明显限制 C1~C2 的活动度。前路与后路经关节螺钉内固定手术对 C1~C2 固定效果基本相同,但术后应尽量避免过度的前屈。齿状突切除后直接前路行 C1~C2 经关节螺钉内固定减少变换体位带来的风险,相对方便直接。

【关键词】 齿状突切除术;螺钉内固定术;颈前入路;颈后入路;生物力学
【文章编号】 1009-153X(2020)10-0696-05 **【文献标志码】** A **【中国图书资料分类号】** R 751.1+1

Biomechanical analysis of anterior and posterior C1~C2 articular screw internal fixation after odontoidectomy
MA Sheng-hui, FENG Yu, GUAN Jiang-heng, ZHANG Zhi-hao, LU Jin-jiang, XIE Tian-hao, SONG Jian, MA Lian-ting.
Department of Neurosurgery, General Hospital of Central Theater Command, PLA, Wuhan 430070, China

【Abstract】 Objective To compare the biomechanical characteristics of anterior and posterior C1~C2 articular screw fixation after odontoidectomy in order to provide a biomechanical basis for clinical selection of anterior and posterior internal fixation treatment options. **Methods** Based on the finite element model of the whole cervical spine that had been constructed in the previous study, the odontoid process resection model was further constructed, and then the anterior C1~C2 internal fixation model and the posterior C1~C2 internal fixation model were constructed in the odontoid process resection model. ABAQUS 6.12.~1 software was used to calculate the range of motion and internal fixation stress of each segment of the surgical model in flexion-post extension, left-right rotation and left-right scoliosis. **Results** Odontoid resection caused a 55% increase in the flexion and an increase of 128.2% in the extension of C1~C2 segment. The anterior approach and the posterior approach have basically the same internal fixation effects on the C1~C2 segments, and both can obviously limit the mobility of the C1~C2 segments and made it in a relatively fixed state. The maximum stress of anterior and posterior C1~C2 internal fixation was in the direction of flexion. **Conclusions** Odontoid resection can significantly reduce the stability of C1~C2 segment, and both anterior and posterior C1~C2 internal fixation with articular screws can significantly limit the motion of C1~C2 segment. Anterior and posterior transarticular screw internal fixation surgeries have basically the same effect on C1~C2 fixation. Patients should try to avoid excessive forward bending after the surgery. C1~C2 internal fixation with articular screws directly reduces the risk of changing positions after resection of the odontoid process, which is relatively convenient and direct.

【Key words】 Odontoid resection; Internal screw fixation; Anterior cervical approach; Posterior cervical approach; Biomechanics

齿状突切除术多应用于颅底凹陷症、寰枢关节脱位、齿状突骨折、齿状突畸形等疾病,这些疾病中齿状突可压迫脑干、颈髓引起相应的症状,严重者出现四肢瘫痪甚至死亡^[1],虽然齿状突切除术可以获得减压效果,但术后常引起生物力学的不稳定,导致颈椎失稳^[2]。齿状突切除术和复位固定术常联合应用,从而获得更加理想的疗效;然而,由于缺乏相关的基础研究,目前尚没有统一的内固定术方案。有学者主张经前路行齿状突切除术,然后直接行 C1~C2 经关节螺钉内固定术。也有学者采用经前路行齿状突

doi:10.13798/j.issn.1009-153X.2020.10.012
基金项目:国家自然科学基金(81701355);武汉市中青年医学骨干人才培养工程
作者单位:430070 武汉,中国人民解放军中部战区总医院神经外科、中国人民解放军神经外科研究所、国家级重点学科神经外科(马生辉、冯 煜、管江衡、张志浩、卢锦江、谢天浩、宋 健、马廉亭)
通讯作者:谢天浩,E-mail: xrang@163.com
宋 健,E-mail: docsongjian@gmail.com

切除术,然后同期或后期行后路C1~C2经关节螺钉内固定术。本研究基于前期已构建的带枕骨全颈椎有限元模型,分析齿状突切除术后C1~C2的生物力学改变,并进一步分析以上两种常用的内固定方式的生物力学特点,为临床选择内固定方案提供生物力学依据。

1 材料与方法

1.1 正常带枕骨全颈椎有限元模型的构建及验证
采用前期已构建的带枕骨全颈椎有限元模型^[3,4]。基于健康男性志愿者(25岁,身高175 cm,体重72 kg)枕颈区CT构建带枕骨全颈椎有限元模型,将CT的DICOM数据导入Mimics 17软件(Materialise Inc., Leuven, Belgium),构建三维点云模型。进而导入Geomagic Studio 12.0软件(Geomagic Inc., Research-Triangle Park, NC, USA)进行曲面构建及曲面优化,从而构建可编辑的NURBS全颈椎曲面模型(枕骨~胸1)。将全颈椎曲面模型导入Hyperworks v10.0软件(Altair engineering Inc., Executive Park, CA, USA)进行实体网格划分、韧带及椎间盘构建、材料属性赋值、定义关节面接触以及设定载荷和边界条件等过程,从而得到枕骨~胸1的全颈椎实体模型。最终构建模型包含颅颈交界区及颈椎所有解剖学结构,包括椎体、椎间盘、所有韧带、小关节等,同时各解剖结构均具有正确的材料属性,且通过有限元验证^[3]。最终所得模型如图1所示。



图1 全颈椎有限元模型的侧位观

1.2 齿状突切除术后内固定模型的建立
1.2.1 齿状突切除模型的构建 采用前期已经建立模型^[3,4]。依照临床中齿状突切除术的操作过程,切除C1前弓及与其相连的C1~2前纵韧带及寰枕前膜,切除齿状突及与齿状突紧密相连的翼状韧带和齿状突尖韧带均予以切除,并切除齿状突后方的横韧带。齿状突切除术后模拟图如图2所示。

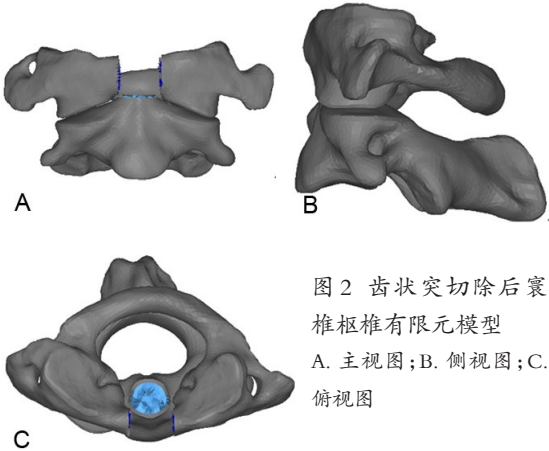


图2 齿状突切除后椎枢椎有限元模型
A. 主视图;B. 侧视图;C. 俯视图

1.2.2 齿状突切除+前路C1~C2经关节螺钉内固定模型(简称前路内固定模型) 按照临床中前路C1~C2经关节螺钉内固定方法,建立前路C1~C2经关节螺钉内固定模型。螺钉直径为3.5 mm(图3A)。在齿状突切除模型基础上,按照文献及临床中该内固定方法建立模型(图3B、3C)。

1.2.3 齿状突切除+后路C1~C2经关节螺钉内固定模型(简称后路内固定模型) 按照临床中后路C1~C2经关节螺钉内固定方法,建立后路C1~C2经关节螺钉内固定模型,螺钉直径为3.5 mm(图4A)。在齿状突切除模型基础上,按后路C1~C2经关节螺钉内固

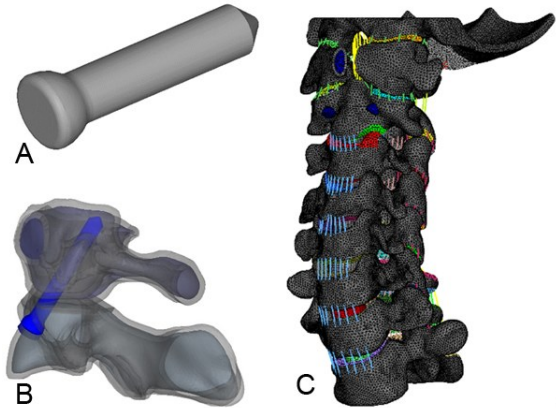


图3 齿状突切除+前路C1~C2经关节螺钉内固定有限元模型
A. 螺钉模型图;B. 齿状突切除术后前路C1~C2经关节螺钉透视模型;C. 前路内固定有限元模型的整体侧位观

表 1 四种有限元模型各方向活动度

有限元模型	前屈	后伸	侧弯	轴向旋转
正常模型	16.1°	10.8°	9.3°	68.0°
齿状突切除模型	25.3°	24.7°	23.9°	90.3°
齿状突切除+前路内固定模型	0.99°	3.67°	1.54°	7.33°
齿状突切除+后路内固定模型	0.88°	3.41°	1.51°	7.43°

定方法建立模型(图 4B、4C)。

1.3 手术模型的生物力学分析 载荷及边界条件和正常模型相同。边界条件为:T1 椎体下缘全部节点各方向固定,位移为 0。载荷条件为:在枕骨上表面对各种手术模型分别施以三个方向(矢状方向、轴向方向及冠状方向) 1.5 Nm 的纯扭矩载荷,在 ABAQUS 6.12.-1 软件中计算手术模型各个节段前屈-后伸、左右旋转及左右侧屈的活动度及内固定应力情况,所得结果同正常模型的结果进行对比。

2 结果

2.1 齿状突切除术后两种内固定方式对上颈椎活动度的影响 正常模型、齿状突切除模型、前路内固定模型、后路内固定模型的活动度情况见表 1。前路内固定模型和后路内固定模型在 C1~C2 节段的内固定效果基本相同。

同正常模型相比,齿状突切除造成 C1~C2 节段前屈活动度明显增加,增加幅度达 55%;C1~C2 内固定可使 C1~C2 节段的前屈活动度接近 0。齿状突切除造成 C1~C2 节段的后伸活动度增加 128.2%,而两种内固定均可使其前屈与后伸活动度降至明显低于正常模型。见表 1。

两种内固定均可使侧弯活动度降至明显低于正

常模型。两种内固定均可使轴向旋转活动度降至明显低于正常模型。

2.2 两种内固定材料的最大应力 前路内固定模型最大应力位于后伸及前屈方向,其他方向应力较低。后路内固定模型较大应力位于后伸及前屈方向,侧弯方向应力较低。见图 5、表 2。

3 讨论

外伤、感染、肿瘤、先天性松弛或异常、退行性疾病或炎性关节炎可导致寰枢关节脱位、颅底凹陷及齿状突骨折,可压迫脊髓并导致神经功能缺陷,甚至危及病人生命^[5]。齿状突是维持 C1~C2 正常活动度的关键结构。齿状突切除术会切除包括齿状突、C1 前弓、翼状韧带、齿状突尖韧带、寰横韧带、覆膜、C1~C2 前纵韧带、寰枕前膜等重要结构^[6]。这些结构的破坏会导致颅颈交界区发生严重的力学失稳,临

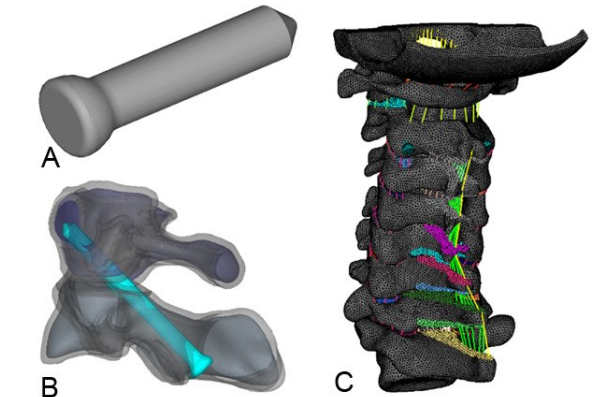


图 4 齿状突切除+后路 C1~C2 经关节螺钉内固定有限元模型 A. 螺钉模型图;B. 齿状突切除术后后路 C1~C2 经关节螺钉透视模型;C. 后路内固定有限元模型的整体侧位观

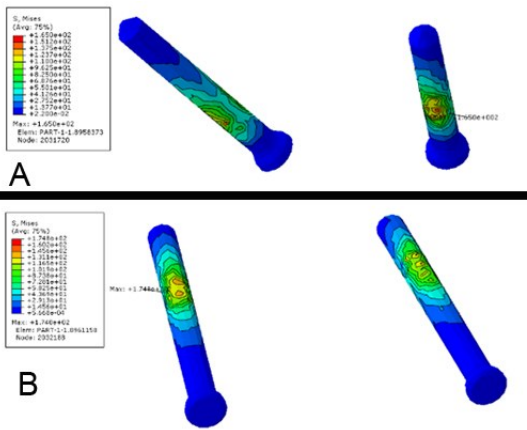


图 5 齿状突切除+C1~C2 经关节螺钉内固定前屈最大应力图

A. 前路内固定;B. 后路内固定

表 2 两种内固定模型各方向最大应力值(MPa)

活动范围	前路内固定	后路内固定
后伸	164.1	173.7
前屈	165	174.8
侧弯	78.5	57.1
轴向旋转	94.2	113.4

床上也经常见到齿状突切除术后会发生颅颈交界区畸形,需后续的 C1~C2 内固定来维持颅颈交界区的稳定性。根据本研究对齿状突切除术后生物力学分析,术后 C1~C2 节段的活动度增加非常显著,因此在齿状突切除术后进行 C1~C2 的固定是非常必要的。然而,C1~C2 内固定的方法及手术入路有很多,包括经口、后外侧、后正中或前外侧入路^[4]。C1 和 C2 椎体之间的融合最开始常采用 Gallie 或 Brooks 方法,使用钢丝或电缆固定。为了增加稳定性,Magerl 和 Seeman 采用了经关节的 C1~C2 螺钉,这种螺钉得到了广泛的应用^[7]。术后影像学随访显示骨融合率高达 100%^[8]。经关节螺钉固定提供了一个 3 轴固定最稳定的结构,可以限制侧弯和轴向旋转^[9]。这意味着它比基于椎板下的金属丝技术更有优势。

Magerl 技术采用经关节突螺钉固定增加了寰枢椎的稳定,被广泛应用并获得良好疗效^[10]。目前,临床中应用的有前路 C1~C2 经关节螺钉内固定及后路 C1~C2 经关节螺钉内固定,但前路固定与后路固定又有各自的优缺点。目前,齿状突切除术+前路经关节螺钉内固定术多采用微创方法,在显微内窥镜或皮下放置双侧前关节螺钉以恢复寰枢关节稳定性^[5]。手术入路简便,只需要做个 1.6 cm 左右的切口,在管状牵开器及内窥镜的帮助下就可以完成 C1 前弓、齿状突的切除、C1 的软组织切除、经关节螺钉的固定以及植骨等操作,减少了组织韧带的剥离和暴露^[7],在对侧做个小切口完成另一个经关节螺钉的植入,微小创伤使得前路内固定取代经口手术。其次,通过对 30°角内窥镜的滑动和旋转,可以在手术过程中获得更广泛和更清晰的视觉效果。由于显微内窥镜可以放大图像,因此可以对寰枢关节进行安全的减压。同时,在内镜下也可以确定螺钉的置入点,减少螺钉置入风险。但是术中放射线暴露对有一定损害,导航技术的应用可能有助于减少放射线暴露^[11]。前路进行椎管减压有时受制于狭小的空间,导致减压不彻底,难以有效完成椎管减压。术后多伴有吞咽困难等并发症,一般 3~5 d 可自行好转^[7]。

后路经关节螺钉内固定可以充分暴露椎骨,术野清楚,可以在直视下完成双侧经关节螺钉的置入。有研究认为单纯经鼻行齿状突切除术可有效减压,辅助后路固定进一步提高了齿状突切除术后减压的程度。但是在行前路 C1 前弓、齿状突等软组织切除后,脊柱变得不稳定,将转卧位进行后路稳定,有可能造成脊髓损伤的潜在风险^[5]。其次,后路经关节螺钉固定由于颈部肌肉剥离会造成的广泛软组织

损伤,尤其是对于老年病人的影响较大^[7]。

无论是前路还是后路内固定,都需要术后 X 线简称观察寰枢椎稳定性,并行薄层 CT 扫描三维重建评价融合情况。

本研究主要分析以上临床中常用的前路及后路经关节螺钉内固定生物力学特点^[12],结果发现,前路及后路 C1~C2 内固定方式在 C1~C2 节段的内固定效果基本相同,均可有效维持 C1~C2 的稳定性,并明显限制 C1~C2 的活动度,小于正常人活动度,尤其是前屈活动度几乎为零。结合齿状突术后行 C1~C2 内固定的文献及本研究结果,我们认为对于齿状突切除术后,行前路 C1~C2 经关节螺钉内固定及后路 C1~C2 经关节螺钉内固定的生物力学及关节活动度基本相同,都可以使寰枢关节活动都小于正常值,起到固定作用。本文中有关内固定模型的应力分析提示两种内固定模型均在前屈时产生最大的应力,这提示术后应尽量提醒病人少做前屈后伸活动,从而避免应力过大致螺钉松动甚至断裂可能。

总之,齿状突切除严重影响 C1~C2 的稳定性,严重时会造成致命的脊髓损伤,因此,术后 C1~C2 节段内固定非常必要。通过对构建的全颈椎有限元模型的生物力学研究,发现前路及后路 C1~C2 经关节螺钉内固定方式在 C1~C2 节段的内固定效果基本相同,均可有效维持 C1~C2 的稳定性。齿状突切除术+前路经关节螺钉内固定术组织损伤轻,出血少,术后恢复快更安全微创,但技术难度相对较大。

【参考文献】

[1] Ning SH, Yang SD, Ding WY, *et al.* Posterior atlantoaxial dislocation without fracture or neurological symptoms treated by transoral- posterior approach surgery: a case report and literature review [J]. *Eur Spine J*, 2019, 28: 37-40.

[2] Chang PY, Yen YS, Wu JC, *et al.* The importance of atlantoaxial fixation after odontoidectomy [J]. *J Neurosurg Spine*, 2016, 24(2): 300-308.

[3] 谢天浩,卢玉昭,王在贵,等. 带有枕骨全颈椎三维有限元模型的构建及生物力学分析[J]. *中国临床神经外科杂志*, 2019, 24(11): 681-684.

[4] 谢天浩,马生辉,丁慧超,等. 齿状突切除术后两种后路内固定方式的生物力学比较[J]. *中国临床神经外科杂志*, 2020, 25(7): 447-450.

[5] Wu YS, Chi YL, Wang XY, *et al.* Microendoscopic anterior

- approach for irreducible atlantoaxial dislocation: surgical techniques and preliminary results [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2010, 23(2): 113-120.
- [6] Dickman CA, Locantore J, Fessler RG, *et al.* The influence of transoral odontoid resection on stability of the craniovertebral junction [J]. *J Neurosurg*, 1992, 77: 525-530.
- [7] Wang J, Zhou Y, Zhang ZF, *et al.* Minimally invasive anterior transarticular screw fixation and microendoscopic bone graft for atlantoaxial instability [J]. *Eur Spine J*, 2012, 21(8): 1568-1574.
- [8] Tang XS, Wu XJ, Tan MS, *et al.* Endoscopic transnasal anterior release and posterior reduction without odontoidectomy for irreducible atlantoaxial dislocation [J]. *J Orthop Surg Res*, 2019, 14(1): 119.
- [9] Nagaria J, Kelleher MO, McEvoy L, *et al.* C1-C2 transarticular screw fixation for atlantoaxial instability due to rheumatoid arthritis: a seven-year analysis of outcome [J]. *Spine*, 2009, 34: 2880-2885.
- [10] Haid RW Jr. C1-C2 transarticular screw fixation: technical aspects [J]. *Neurosurgery*, 2001, 49: 71-74.
- [11] 陆焱, 王建, 郑文杰, 等. 微创前路经寰枢椎关节突固定融合治疗寰枢椎不稳[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2012, 26(7): 769-772.
- [12] Haghpasani M, Mapar R. Development of a parametric finite element model of lower cervical spine in sagittal plane [J]. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2006, 2006: 1739-1741.
- (2020-08-11 收稿, 2020-08-25 修回)
-
- (上接第 673 页)
- [2] Tümtürk A, Li Y, Turan Y, *et al.* Emergency resection of brainstem cavernous malformations [J]. *J Neurosurg*, 2018, 128(5): 1289-1296.
- [3] Aboukays R, Estrade L, Devos P, *et al.* Gamma knife radiosurgery of brainstem cavernous malformations [J]. *Stereotact Funct Neurosurg*, 2016, 94(6): 397-403.
- [4] Lopez-Serrano R, Martinez NE, Kusak ME, *et al.* Significant hemorrhage rate reduction after gamma knife radiosurgery in symptomatic cavernous malformations: long-term outcome in 95 case series and literature review [J]. *Stereotact Funct Neurosurg*, 2017, 95(6): 369-378.
- [5] Garrett M, Spetzler RF. Surgical treatment of brainstem cavernous malformations [J]. *Surg Neurol*, 2009, 72 Suppl 2: S3-10.
- [6] Porter R, Detwiler P, Spetzler R, *et al.* Cavernous malformations of the brainstem: experience with 100 patients [J]. *J Neurosurg*, 1999, 90(1): 50-58.
- [7] 毛颖, 周良辅, 梁勇, 等. 脑干海绵状血管瘤的显微手术治疗[J]. *中华医学杂志*, 2001, 91(6): 9-10.
- [8] 王忠诚, 刘阿力. 脑干内血管畸形的诊断及治疗--附 100 例病例报告[J]. *中国医学科学院学报*, 1999, 21(6): 4-9.
- [9] Cannizzaro D, Sabatino G, Mancarella C, *et al.* Management and surgical approaches of brainstem cavernous malformations: our experience and literature review [J]. *Asian J Neurosurg*, 2019, 14(1): 131-139.
- [10] Zaidi H, Mooney M, Levitt M, *et al.* Impact of timing of intervention among 397 consecutively treated brainstem cavernous malformations [J]. *Neurosurgery*, 2017, 81(4): 620-626.
- [11] Bruneau M, Bijlenga P, Reverdin A, *et al.* Early surgery for brainstem cavernomas [J]. *Acta Neurochir (Wien)*, 2006, 148(4): 405-414.
- [12] Ohue S, Fukushima T, Friedman A, *et al.* Retrosigmoid suprafloccular transhorizontal fissure approach for resection of brainstem cavernous malformation [J]. *Neurosurgery*, 2010, 66(6 Suppl Operative): 306-312.
- [13] Abula A, Spetzler R. Brainstem cavernoma surgery: the state of the art [J]. *World Neurosurg*, 2013, 80(1-2): 44-46.
- [14] Giliberto G, Lanzino D, Diehn F, *et al.* Brainstem cavernous malformations: anatomical, clinical, and surgical considerations [J]. *Neurosurg Focus*, 2010, 29(3): E9.
- [15] Georgieva VB, Krastev ED. Surgical treatment of brainstem cavernous malformation with concomitant developmental venous anomaly [J]. *Asian J Neurosurg*, 2019, 14(2): 557-560.
- [16] Gross BA, Batjer HH, Awad IA, *et al.* Brainstem cavernous malformations: 1390 surgical cases from the literature [J]. *World Neurosurg*, 2013, 80(1-2): 89-93.
- [17] Maish W. Developmental venous anomalies and brainstem cavernous malformations: a proposed physiological mechanism for haemorrhage [J]. *Neurosurg Rev*, 2019, 42(3): 663-670.
- [18] Chen L, Zhang H, Chen L, *et al.* Minimally invasive resection of brainstem cavernous malformations: surgical approaches and clinical experiences with 38 patients [J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 2014, 116: 72-79.
- (2020-04-27 收稿, 2020-07-25 修回)