

基础研究

枢椎棘突作为第三锚定点枕颈固定的生物力学有限元分析

刘观燧¹, 沈 锋², 李 庆³, 周雷杰¹, 廖旭昱¹, 韩金明¹, 马维虎¹

(1 浙江省宁波市第六医院脊柱外科 315040; 2 宁波大学医学院研究生部 315211 宁波市;

3 浙江省宁波市鄞州区第二医院内分泌科 315192)

【摘要】目的:通过有限元方法分析枢椎棘突作为第三锚定点枕颈固定的生物力学稳定性。**方法:**选择一位健康成年人的 C0-C3 CT 资料,利用 Mimics、Hypermesh 和 Abaqus 等软件建立上颈椎有限元模型(完整模型)。模拟寰椎 Jefferson 骨折后进行枕颈固定,分别为双侧枢椎椎弓根螺钉+枢椎棘突螺钉+枕骨螺钉钉棒固定(第三锚定点枕颈固定组)和双侧枢椎椎弓根螺钉+枕骨螺钉钉棒固定(双侧枢椎椎弓根螺钉枕颈固定组)。在骨折模型前和固定后,分别施加 50N 垂直载荷,模拟头部重力作用,施加 1.5N·m 纯扭矩,从而模拟颈椎前后屈伸、左右旋转、左右侧屈 6 种状态。在动态加载中,计算固定前和后 C0/1、C1/2、C2/3 关节间在前屈、后伸、左右侧屈和旋转 6 个方向上的活动度(ROM)。**结果:**本研究建立的上颈椎(C0-C3)三维非线性有限元模型外形与正常上颈椎解剖结构相符,韧带连接一致,能较好地体现上颈椎的解剖特点。在边界范围和载荷条件相同的情况下,本研究完整模型的 ROM 在体外标本实验研究参考文献的实验数据范围内,具有很好的关联性。双侧枢椎椎弓根螺钉固定组和第三锚定点固定组在屈伸、侧屈和旋转运动 C0-C2 ROM 结果均较完整模型组显著降低,其中差异最大的在 C1/2 旋转活动上。可见,两种固定方法都可以对骨折模型起到较好的稳定作用。除 C0/1 的侧屈活动外,第三锚定点固定组在其余各个方向上 C0-C2 固定后 ROM 均较双侧枢椎椎弓根螺钉固定组降低,其中差异最大的在 C0/1 屈伸活动上。**结论:**枕颈固定融合中枢椎棘突作为第三锚定点也许可以进一步加强枕颈屈伸的稳定性,减少内固定失败的发生。

【关键词】有限元分析;颈椎;棘突螺钉

doi:10.3969/j.issn.1004-406X.2020.04.11

中图分类号:R318.01,R687.3 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2020)-04-0360-06

A finite element analysis of spinous process screw as a third anchor point in C2 for occipitocervical fixation/LIU Guanyi, SHEN Feng, LI Qing, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2020, 30 (4): 360-364, 371

【Abstract】Objectives: This study aimed to determine the biomechanical feasibility of spinous process screw as a third anchor point in C2 for occipitocervical fixation through a finite element analysis. **Methods:** A models of the upper cervical spine (C0-C3) supplied by an adult were reconstructed using computed tomography images. The images were processed using commercially-available software, such as Mimics, Hypermesh and Abaqus software. A nonlinear finite element model of C0-C3 had been developed and validated. Then the C1 fracture models were simulated and occipitocervical fixation was completed. Two different fixation techniques of occipitocervical fixation were applied. The inferior surface of the C3 vertebra was constrained completely. Vertical load of 50N was applied on the C0 to simulate head weight, and 1.5N·m torque was applied to the C0 to simulate flexion, extension, lateral bending, and axial rotation. The range of motion(ROM) of the C0/1, C1/2 and C2/3 segments of the models was measured for intact and fixation models respectively.

基金项目:浙江省 151 人才工程(2017 年度);2018 年宁波市自然科学基金(2018A610259);浙江省医药卫生科技计划(2020RC110);浙江省公益技术研究计划(LGF20H060007)

第一作者简介:男(1981-),医学博士,副主任医师,研究方向:脊柱外科和创伤骨科

电话:(0574)87996113 E-mail:18906628697@163.com

通讯作者:马维虎 E-mail:weihu_ma@163.com

Results: A nonlinear finite element model of C0–C3 had been developed and validated with the normal upper cervical spine. Since the boundary and loading conditions in these studies were comparable, we compared the ROM of the C0–C3 segments of the intact finite element models with the results of the in vitro test to validate our model. Compared with the intact model, both the bilateral C2 pedicle screw group and the spinous process screw as a third anchor point group reduced the ROM of C0–C2 in the occipitocervical fixation. Compared with the bilateral C2 pedicle screw group, the spinous process screw as a third anchor point group further reduced the ROM of C0–C2 in the occipitocervical fixation except lateral bending of C0/1.

Conclusions: In the occipitocervical fixation, the spinous process screw as a third anchor point group combined with the bilateral C2 pedicle screw fixation may enhance the stability of the occipitocervical joint.

【Key words】 Finite element analysis; Cervical spine; Spinous process screw

【Author's address】 Department of Orthopedics, Ningbo NO.6 Hospital, Ningbo, 315040, China

枕颈段各种疾病均可引起枕颈不稳,往往需要后路手术枕颈固定和融合^[1-3]。然而,枕颈交界处颈椎活动度大和剪力较为集中,Bhatia等^[4]报道枕颈固定术后患者的内固定失败率约4%。Guppy等^[5]发现老年患者枕颈固定术后由于内固定原因再手术率约为14.9%。枕颈固定包括枕骨侧和颈椎侧固定。枕骨侧(C0)螺钉锚定点相对固定,而颈椎侧的固定根据具体的临床具体情况而有多种变化,枢椎(C2)是枕颈固定中颈椎侧常用的螺钉锚定点,双侧置入的枢椎椎弓根螺钉可以提供三柱的稳定性,能满足大部分临床固定稳定性需要。然而,对于部分患者,特别是在一些骨质疏松、老年患者、解剖变异等情况下,枕颈固定术后的内固定松动可能性上升,往往需要在颈椎侧向下颈椎延伸应用多节段固定,如从C0固定到C3甚至C4,用更多的固定节段和螺钉,以达到稳定的固定效果,促进植骨融合,防止内固定术后松动^[4-6]。但颈椎侧固定节段的向下延伸,必然会影响患者术后的颈椎活动功能^[7]。枢椎具有颈椎中最大的棘突,基础和临床研究均已证实枢椎棘突螺钉固定具有一定可行性^[8-11],把枢椎棘突作为第三螺钉锚定点,在枢椎双侧置入2枚椎弓根螺钉固定的同时,在枢椎棘突上置入第3枚螺钉,枢椎共3枚螺钉与枕骨侧螺钉钉棒连接,既能进一步增加枕颈固定的稳定性,降低术后内固定松动的可能性,又可以减少颈椎侧的固定节段,从而保留更多的颈椎节段活动功能,减少术后颈部僵硬等症状的发生。然而,这一改良固定方案尚未见国内外研究报道,其在生物力学上的稳定性和传统固定方法的区别尚不清楚。本研究拟运用有限元方法,研究枢椎棘突作为第三锚定点枕颈固定的生物力学稳定性,为这项技术的推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 枕颈模型建立

经医院伦理委员会批准。选择1例成年志愿者颈椎CT影像学资料,排除该志愿者颈椎外伤骨折等病理情况。按照参考文献方法,依次分别建立曲面实体模型、有限元分析前处理、网格划分、材料属性和边界和载荷条件的设定,建立C0–C3完整模型^[12-14]。皮质骨、松质骨、终板和内固定器械(Ti)采用均质线弹性材料属性,主要参数见表1。运用Abaqus软件进行有限元分析C0/1、C1/2、C2/3关节间在前屈、后伸、侧屈和左右旋转6个方向上的活动度(range of motion,ROM),与参考文献经典体外颈椎生物力学实验结果对比,证实有效性。

1.2 Jefferson骨折模型的建立和固定

将实体模型导入Hypermesh软件进行网格划分,利用Hypermesh软件中的单元编辑功能删除寰椎前后弓两侧单元,形成4处宽度为2.0~3.0mm的骨折线,模拟Jefferson寰椎四部分骨折。在Solidworks软件中建立置入物模型,C2椎弓根螺钉的置钉技术参考Harms技术^[15];枕骨螺钉的置钉点位于枕骨内外侧结节和枕外隆凸;枢椎棘

表1 材料属性

Table 1 Material properties used in the finite element model

结构名称 Components	弹性模量(Mpa) Young's modulus	泊松比 Poisson's ratio	单元数 Elements
皮质骨 Cortical bone	12000 ^[3]	0.3	35208
松质骨 Cancellous bone	500 ^[3]	0.3	97588
终板 End plates	500 ^[4]	0.4	9088
Ti	120000	0.3	

突螺钉应用垂直固定技术:进钉点为棘突背侧顶点,螺钉方向为垂直置入^[11]。枕骨螺钉达到双层皮质固定,枕骨板包含带有中线枕骨钉的 3 个锁定孔。

模拟临床进行枕颈固定。内固定系统两侧由多轴螺钉排列,棒被弯曲至接近枕颈生理曲度,最后将多轴螺钉锁紧。应用 Abaqus 里的嵌入限制指令来达到有限元模型里的螺钉和骨之间的有效连接。所有构造部件都使用医用钛合金,包括螺钉、棒和板。弹性模量为 120MPa,泊松比为 0.3,螺钉-钛棒-螺帽间装配接触关系参考骨骼-螺钉,均设置为面-面接触绑定关系。

枕颈固定分为两组,即双侧枢椎椎弓根+枕骨钉棒固定(双侧椎弓根螺钉固定组)和双侧枢椎椎弓根+枢椎棘突+枕骨钉棒固定(第三锚定点固定组)进行 C0 枕骨螺钉加枢椎螺钉形成完整的枕颈固定(图 1)。

1.3 固定组间 ROM 对比

根据参考文献方案^[5-7],首先约束 C3 椎体下表面 6 个自由度,对参考点分步施加 50N 垂直载荷和 1.5N·m 扭矩应用于 C0,扭矩沿着轴线模拟颈椎前后屈伸、左右旋转、左右侧屈 6 种状态,并计算 C0/1、C1/2 和 C2/3 节段的 ROM。

2 结果

本研究建立模型的 C0/1、C1/2 和 C2/3 屈/伸、

侧屈、旋转运动 ROM 见表 2。本研究模型的边界范围和载荷条件与 Panjabi 等^[16]和 Ito 等^[17]研究相似,研究结果的 ROM 值和参考文献见表 2。

完整模型组与两种固定组的屈伸、侧屈和旋转方向的 ROM 见表 3。双侧椎弓根螺钉组和第三锚定点固定组在屈伸、侧屈和旋转运动 C0-C2 ROM 结果均较完整模型组显著降低,其中差异最大的在 C1/2 旋转活动上。两种固定方法都可以对骨折模型起到较好的稳定作用。由于 C2/3 没有进行固定,所以二个固定组和完整模型组 C0-C3 ROM 差异不明显。除 C0/1 的侧屈活动外,第三锚定点固定组在各个方向上 C0-C2 固定后 ROM,均较双侧椎弓根螺钉固定组降低,其中差异最大的在 C0/1 屈伸活动上。

3 讨论

对于颈椎 ROM 正常范围的在体和体外实验研究报道较多,尚未统一公认数值标准^[12-14,16,17],但目前颈椎有限元研究模型建立的验证多以 Panjabi 等^[16]的体外实验结果为参考。本研究完整有限元模型的 ROM 结果主要与 Panjabi 等^[16]和 Ito 等^[17]的体外实验研究结果比较。Panjabi 等^[16]通过应用颈椎尸体标本,分别围绕 X、Y、Z 坐标轴模拟颈椎前后屈伸、左右旋转、左右侧屈 6 种状态,分别计算了颈椎各个节段三维活动的 ROM 结果。本研究完整有限元模型的 C0/1 的屈伸 ROM



图 1 枢椎棘突作为枕颈固定第三锚定点的有限元模型图 a 正面观 b 侧面观

Figure 1 The finite element model of the occipito-cervical region with the axial spinous process screw being used as a third anchor point in C2 for occipitocervical fixation **a** A-P view **b** Lateralview

表 2 完整模型 C0-C3 屈伸、侧屈、旋转运动的 ROM 与参考文献比较 (°)

Table 2 The ROM in flexion, extension, lateral bending, and axial rotation of the intact finite element model of C0-C3 segments comparing with the results of the literatures

	前屈+后伸 Flexion+extension			侧屈 Lateral bending			旋转 Axial rotation		
	Panjabi 等 ^[16] Panjabi et al	Ito 等 ^[17] Ito et al	本研究 This study	Panjabi 等 ^[16] Panjabi et al	Ito 等 ^[17] Ito et al	本研究 This study	Panjabi 等 ^[16] Panjabi et al	Ito 等 ^[17] Ito et al	本研究 This study
C0/1	27.4±3.7	27.5±7.7	19.9	9.1±1.5	7.7±2.1	6.1	9.9±3.0	13±5.5	10.4
C1/2	24.4±5.6	15.3±4.2	23.2	6.5±2.3	11.6±10.4	6.7	56.7±4.8	63.3±13	55.5
C2/3	6.2±1.4	9.0±4.0	9.7	9.6±1.8	9.7±4.3	12.7	3.3±0.8	6.6±4.8	6.3

表 3 3 组屈伸、侧屈、旋转的 ROM (°)

Table 3 The ROM results of flexion-extension, lateral bending and axial rotation

	C0/1	C1/2	C2/3
屈伸 Flexion-extension			
完整模型组 Intact model group	19.9	23.2	9.7
双侧椎弓根螺钉组 Bilateral pedicle screw group	0.6	2.5	9.0
第三锚定点固定组 Third anchor point fixation group	0.2	1.8	8.9
侧屈 Lateral bending			
完整模型组 Intact model group	6.1	6.6	12.7
双侧椎弓根螺钉组 Bilateral pedicle screw group	0.8	1.2	12.5
第三锚定点固定组 Third anchor point fixation group	0.9	1.1	12.9
旋转 Axial rotation			
完整模型组 Intact model group	10.3	55.4	6.3
双侧椎弓根螺钉组 Bilateral pedicle screw group	0.7	0.7	6.1
第三锚定点固定组 Third anchor point fixation group	0.6	0.7	6.0

数值稍低,但仍在 Panjabi 等^[16]和 Ito 等^[17]体外实验研究结果 27.4°和 27.5°的范围内。本研究完整有限元模型的 C1/2 和 C2/3 的屈伸 ROM 也在参考文献研究结果范围之内;侧屈 ROM 也在 Panjabi 等^[16]和 Ito 等^[17]体外实验研究结果范围内;旋转运动 ROM 结果以 C1/2 数值最大,符合寰枢椎旋转活动的生理状态,均在体外实验研究结果范围内^[27,28]。可见本研究完整枕颈模型具有很好的关联性和有效性。

枢椎在颈椎中具有最宽大的棘突,是术中定位标志。解剖学研究发现枢椎棘突平均高度为 12.9mm,棘突根部的平均厚度为 18.8mm⁸,具有螺钉固定可行性。Dou 等^[18]通过 14 具枢椎标本测

量,也得出类似的研究结论。进一步的 100 例颈椎 CT 资料测量,发现枢椎棘突基底部、椎板中段和椎弓根中段宽度和高度分别为 19.5mm、6.1mm、5.8mm、13.1mm、12.6mm 和 5.7mm,枢椎棘突宽度和高度均明显宽于椎板和椎弓根,具有枢椎椎弓根和椎板更大的置钉空间^[19]。生物力学研究显示,在 8 具新鲜尸体枢椎标本两侧随机进行枢椎棘突螺钉和椎弓根螺钉固定,枢椎棘突螺钉的平均拔出强度为 387N,稍小于枢椎椎弓根螺钉的平均拔出强度 465N,但两者间差异无统计学意义^[20]。Dou 等^[17]通过 14 具枢椎标本进行枢椎椎弓根螺钉、椎板螺钉和棘突螺钉抗拔出对比,发现三者平均抗拔出强度较为接近。在临床应用方面,枢椎棘突螺钉固定主要是在解剖变异等情况下作为椎弓根螺钉固定的替代技术应用,并已有小规模临床病例报道^[11,21]。

2004 年 Goel 等^[11]首先临床报道了使用枢椎棘突螺钉在枕颈固定中的应用。在 11 例先天性枕颈畸形儿童患者后路枕颈 C0-C2 固定融合术中,在枢椎棘突垂直置入 2 枚螺钉,再通过 2 块钢板固定到枕骨钉上,共置入 14 枚棘突螺钉,均取得满意的固定和融合,无一例再手术。枢椎棘突螺钉钉道可以完全直视下置钉,避开椎动脉和脊髓,不仅具有一定的生物力学稳定性,而且操作简易,椎动脉和脊髓损伤风险低,值得临床推广^[11,21]。

枕颈固定中一般以 C0-C1-C2 作为标准的枕颈固定节段^[22]。枕颈固定包括枕骨侧和颈椎侧固定。颈椎侧的固定节段一般包括 C1、C2,甚至固定到 C3、C4。在一些畸形、骨质疏松等病例情况下,如何既能进一步增加枕颈固定的稳定性,降低术后内固定松动的可能性,又可以减少颈椎侧的固定节段,从而保留更多的颈椎节段活动功能,减少术后颈部僵硬等症状的发生,是临床待解决的主要问题。本研究发现在枢椎双侧椎弓根螺钉固定

的同时增加第三锚定点固定,在屈伸、侧屈和旋转运动 C0-C2 ROM 结果均较完整模型组显著降低,可以对骨折模型起到较好的稳定作用。此外,第三锚定点固定组在各个方向上 C0-C2 固定后 ROM,均较双侧椎弓根螺钉组降低,其中差异最大的在 C0/1 屈伸活动上。这提示枢椎棘突作为第三锚定点固定也许可以进一步加强枕颈固定中颈椎侧的稳定性。

把枢椎棘突作为第三螺钉锚定点,在枢椎常规置入双侧二枚椎弓根螺钉固定同时,在枢椎棘突上置入第三枚螺钉,使得枢椎共三枚螺钉与枕骨侧螺钉连接。本研究发现,枢椎棘突作为第三锚定点固定不仅可以对模拟 Jefferson 四部分骨折进行有效的稳定,而且在多个方向上均较双侧椎弓根螺钉固定组 C0-C2 ROM 降低。这项研究提示枢椎棘突作为第三锚定点固定也许可以较常规双侧枢椎椎弓根螺钉固定进一步加强枕颈固定的稳定性。枢椎棘突螺钉的长度和直径是重要的参数,本研究置入的是“垂直”螺钉,螺钉的头端指向椎管内的脊髓,因此在实际的临床应用时应在术前 CT 上仔细测量钉道长度,避免螺钉过长脊髓损伤。

在一些枕颈畸形不稳、骨质疏松等特殊情况下,这项第三锚定点固定技术也许既能增加枕颈固定中颈椎侧的稳定性,又可以减少颈椎侧的固定节段,从而保留更多的颈椎节段活动功能,促进患者术后康复,具有一定的临床意义。

然而,本研究有一定的局限性。比如本研究模型选择 Jefferson 骨折作为枕颈固定的模型,枕颈固定临床最常见的情况是寰枕融合和寰枢脱位,而 Jefferson 骨折采用枕颈固定有较多争议^[24,25]。现临床使用的枕骨板上的螺钉均为纵向一直线排布,枢椎椎弓根螺钉应尽量平行椎弓根上皮质,本研究模拟临床状态,可能和实际情况有些出入从而影响数据结果。枕颈部的屈和伸活动度存在明显不同,因此,也许结果应将屈和伸进行分开,以便判断内固定对于前后柱稳定作用的差别。有限元分析尚可进行内固定的应力分布和峰值数据,但本研究初步分析,未见明显规律,未纳入本文中。有限元研究本身是在一定条件下,且常常是理想条件下的仿真研究。其韧带、椎间盘、肌肉等因素在现有的技术条件下无法很好地模拟。因此,其结果与尸体标本研究肯定存在差距。关节结构越

多、越复杂,其差距越大。有限元研究没有肌肉韧带组织,没有考虑到融合在枕颈稳定中的作用,未在尸体标本实验中验证。

综上所述,枢椎棘突作为第三锚定点联合双侧椎弓根螺钉固定也许可以进一步加强枕颈固定中颈椎侧的稳定性,减少内固定失败发生率。

4 参考文献

1. Engler JA, Smith ML. Use of intraoperative fluoroscopy for the safe placement of C2 laminar screws: technical note [J]. Eur Spine J, 2015, 24(12): 2771-2775.
2. Singh PK, Garg K, Sawarkar D, et al. Computed tomography-guided C2 pedicle screw placement for treatment of unstable hangman fractures[J]. Spine, 2014, 15, 39(18): E1058-1065.
3. Wang J, Xia H, Ying Q, et al. An anatomic consideration of C2 vertebrae artery groove variation for individual screw implantation in axis[J]. Eur Spine J, 2013, 22(7): 1547-1552.
4. Bhatia R, Desouza RM, Bull J, et al. Rigid occipitocervical fixation: indications, outcomes, and complications in the modern era[J]. J Neurosurg Spine, 2013, 18(4): 333-339.
5. Clarke MJ, Toussaint LR, Kumar R, et al. Occipitocervical fusion in elderly patients[J]. World Neurosurg, 2012, 78(3-4): 318-325.
6. Weng C, Tian W, Li ZY, et al. Surgical management of symptomatic os odontoideum with posterior screw fixation performed using the magerl and harms techniques with intraoperative 3-dimensional fluoroscopy-based navigation[J]. Spine, 2012, 37(21): 1839-1846.
7. Liu H, Zhang B, Lei J, et al. Biomechanical role of the C1 lateral mass screws in occipitoatlantoaxial fixation: a finite element analysis[J]. Spine, 2016, 41(22): E1312-E1318.
8. 刘观懿, 徐荣明, 马维虎, 等. 枢椎后路棘突螺钉固定技术及其解剖学研究[J]. 中华外科杂志, 2010, 48(21): 1653-1656.
9. 刘观懿, 徐荣明, 马维虎, 等. 枢椎棘突椎板螺钉固定技术及其解剖学研究[J]. 中华外科杂志, 2011, 49(2): 162-165.
10. Liu G, Mao L, Xu R, et al. Biomechanical comparison of pedicle screws versus spinous process screws in C2 vertebra: a cadaveric study[J]. Indian J Orthop, 2014, 48(6): 550-554.
11. Goel A, Kulkarni AG. Screw implantation in spinous process for occipitoaxial fixation[J]. J Clin Neurosci, 2004, 11(7): 735-737.
12. Brolin K, Halldin P. Development of a finite element model of the upper cervical spine and a parameter study of ligament characteristics[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2004, 29(4): 376-385.
13. Zhang H, Bai J. Development and validation of a finite element model of the occipito-atlantoaxial complex under physiologic loads[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2007, 32(9): 968-974.

(下转第 371 页)

6. Li Y, Gu J, Liu Y, et al. iNOS participates in apoptosis of spinal cord neurons via p-BAD dephosphorylation following ischemia/reperfusion(I/R) injury in rat spinal cord[J]. *Neurosci Lett*, 2013, 545: 117-122.
 7. Okada Y, Yamazaki H, Sekine-Aizawa Y, et al. The neuron-specific kinesin superfamily protein KIF1A is a unique monomeric motor for anterograde axonal transport of synaptic vesicle precursors[J]. *Cell*, 1995, 81(5): 769-780.
 8. Yang ML, Li JJ, So KF, et al. Efficacy and safety of lithium carbonate treatment of chronic spinal cord injuries: a double-blind, randomized, placebo-controlled clinical trial[J]. *Spinal Cord*, 2012, 50(2): 141-146.
 9. Apostolidis A, Thompson C, Yan X, et al. An exploratory, placebo-controlled, dose-response study of the efficacy and safety of onabotulinumtoxinA in spinal cord injury patients with urinary incontinence due to neurogenic detrusor overactivity[J]. *World J Urol*, 2013, 31(6): 1469-1474.
 10. Hirokawa N, Noda Y, Tanaka Y, et al. Kinesin superfamily motor proteins and intracellular transport [J]. *Nat Rev Mol Cell Biol*, 2009, 10(10): 682-696.
 11. Ogura K, Asakura T, Goshima Y. Localization mechanisms of the axon guidance molecule UNC-6/Netrin and its receptors, UNC-5 and UNC-40, in *Caenorhabditis elegans* [J]. *Dev Growth Differ*, 2012, 54(3): 390-397.
 12. Wang J, Zhai W, Yu Z, et al. Neuroprotection exerted by Netrin-1 and Kinesin motor KIF1A in secondary brain injury following experimental intracerebral hemorrhage in rats [J]. *Front Cell Neurosci*, 2017, 11: 432.
 13. Stavoe AK, Hill SE, Hall DH, et al. KIF1A/UNC-104 transports ATG-9 to regulate neurodevelopment and autophagy at synapses[J]. *Dev Cell*, 2016, 38(2): 171-185.
 14. Tanaka Y, Niwa S, Dong M, et al. The molecular motor KIF1A transports the TrkA neurotrophin receptor and is essential for sensory neuron survival and function [J]. *Neuron*, 2016, 90(6): 1215-1229.
 15. 张新颖, 毛景东, 杨晓燕, 等. AMPK/mTOR 信号通路的研究进展[J]. *微生物学杂志*, 2019, 39(3): 109-116.
 16. 许延龙, 武珂鑫, 王前, 等. AMPK-mTOR 信号通路参与百草枯致 PC12 细胞的自噬抑制作用[J]. *中华劳动卫生职业病杂志*, 2018, 36(11): 801-807.
 17. Liu L, Sun T, Xin F, et al. Nerve Growth Factor Protects Against Alcohol-Induced Neurotoxicity in PC12 Cells via PI3K/Akt/mTOR Pathway[J]. *Alcohol Alcohol*, 2017, 52(1): 12-18.
 18. Park YS, Park JH, Ko J, et al. mTOR inhibition by rapamycin protects against deltamethrin-induced apoptosis in PC12 cells[J]. *Environ Toxicol*, 2017, 32(1): 109-121.
- (收稿日期:2019-11-22 末次修回日期:2020-03-27)
(英文编审 庄乾宇/谭 啸)
(本文编辑 姜雅浩)

(上接第 364 页)

14. Zhang B, Liu H, Cai X, et al. Biomechanical comparison of modified TARP technique versus modified Goel technique for the treatment of basilar invagination: a finite element analysis[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2016, 41(8): E459-466.
 15. Harms J, Melcher RP. Posterior C1-C2 fusion with polyaxial screw and rod fixation[J]. *Spine*, 2001, 26(22): 2467-2471.
 16. 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.
 17. Ito S, Ivancic PC, Panjabi MM, et al. Soft tissue injury threshold during simulated whiplash: a biomechanical investigation[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2004, 29(9): 979-987.
 18. Dou N, Lehrman JN, Newcomb AGUS, et al. A novel C2 screw trajectory: preliminary anatomic feasibility and biomechanical comparison[J]. *World Neurosurg*, 2018, 113: e93-e100.
 19. 刘观葵, 叶鹏翰, 张峰. 枢椎棘突、椎板和椎弓根的 CT 测量 [J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2013, 28(5): 401-402.
 20. 刘观葵, 徐荣明, 马维虎, 等. 枢椎棘突螺钉与椎弓根螺钉的解剖学比较[J]. *中国骨伤*, 2011, 24(8): 659-661.
 21. Nagata K, Baba S, Chikuda H, et al. Use of C2 spinous process screw for posterior cervical fixation as substitute for laminar screw in a patient with thin laminae [J]. *BMJ Case Rep*, 2013, 24: 2013. pii: bcr2013009889.
 22. Guppy KH, Brara HS, Bernbeck JA. Occipitocervical fusions in elderly patients: mortality and reoperation rates from a national spine registry[J]. *World Neurosurg*, 2016, 86: 161-167.
 23. Helgeson MD, Lehman RA Jr, Sasso RC, et al. Biomechanical analysis of occipitocervical stability afforded by three fixation techniques[J]. *Spine J*, 2011, 11(3): 245-250.
 24. 廖穗祥, 张东升, 郑勇强, 等. 新型一体化人工枢椎力学性能的有限元分析[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2019, 29(8): 741-746.
 25. 马飞, 廖晖晖, 王清, 等. 颅底凹陷症伴寰枢椎脱位患者的寰枢椎侧块关节影像学分型[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2019, 29(7): 613-620.
- (收稿日期:2020-01-07 修回日期:2020-04-14)
(英文编审 谭 啸)
(本文编辑 李伟霞)