

寰枢椎脱位三维非线性有限元模型的建立和分析

陈金水¹,倪斌¹,陈博²,王明飞³,谢宁¹,郭群峰¹,周凤金¹,杨健¹

(1 第二军医大学附属长征医院骨科 200003 上海市;2 上海交通大学附属瑞金医院伤骨科研究所 200025;

3 上海市普陀区中心医院骨科 200062)

【摘要】目的:探索寰枢椎脱位有限元模型的建模方法及其在寰枢椎脱位临床治疗中的作用。**方法:**在正常上颈椎三维非线性有限元模型的基础上结合临床实际寰枢椎脱位病例,应用有限元软件,建立横韧带断裂而不伴有齿状突骨折的寰枢椎前脱位有限元模型,进行有限元分析,测量并比较正常上颈椎模型和寰枢椎脱位模型在屈、伸、侧屈、旋转等工况下的活动度(ROM)。**结果:**在正常上颈椎三维非线性有限元模型的基础上结合临床实际寰枢椎脱位病例建立的横韧带断裂不伴齿状突骨折的寰枢椎前脱位有限元模型外观逼真,几何相似性好,各个工况下的活动度较正常上颈椎模型明显增大,尤其是前屈增加了 17.8°,后伸增加了 13.7°。**结论:**寰枢椎脱位非线性三维有限元模型能够较好地模拟临床实际脱位病例,可用于临床对寰枢椎脱位患者的生物力学分析,从而指导制定寰枢椎脱位的治疗策略。

【关键词】寰枢椎脱位;有限元;生物力学

doi:10.3969/j.issn.1004-406X.2010.09.13

中图分类号:R684.7,R318.01 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2010)-09-0749-05

Establishment and analysis of a three-dimensional finite element model of atlantoaxial dislocation/CHEN Jinshui,NI Bin,CHEN Bo,et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord,2010,20(9):749~753

【Abstract】 Objective:To establish a three-dimensional finite element model of atlantoaxial dislocation and evaluate its feasibility in clinical practice.**Method:**Based on a finite element model of a normal upper cervical spine,a finite element model of atlantoaxial anterior displacement due to C1 transverse ligament rupture with no fracture was developed according to a clinical case.The range of motion under flexion-extension,lateral bending and axial rotation were measured and analyzed in the normal and abnormal model.**Result:**The finite element model of atlantoaxial anterior dislocation with transverse atlantal ligament failure with no odontoid fracture had the same similarity and profile as the clinical case.The range of motion under each movement in abnormal model was larger than in the normal model,especially in flexion and extension movement which increased by 17.8° and 13.7° respectively.**Conclusion:**The finite element model can be used to simulate the biomechanics of atlantoaxial dislocation with transverse atlantal ligament rupture with no odontoid fracture, which is helpful to determine the treating strategy.

【Key words】Atlantoaxial dislocation;Finite element;Biomechanics

【Author's address】Department of Orthopaedics,Changzheng Hospital,the Second Military Medical University, Shanghai,200003,China

寰枢椎脱位是常见的上颈椎损伤,可导致脊髓受压,甚至危及生命。有限元方法作为一种新的生物力学研究方法,近年来越来越多地应用于颈椎生物力学分析,但针对寰枢椎脱位的有限元研究目前国内外鲜有报道。本研究在正常上颈椎三

维有限元模型基础上结合临床常见寰枢椎脱位病例建立寰枢椎脱位三维非线性有限元个体化模型(以下简称寰枢椎脱位有限元模型),并对其进行有限元分析,探索寰枢椎脱位有限元模型的建模方法和有限元方法在寰枢椎脱位临床治疗中的作用。

1 材料与方法

1.1 正常上颈椎三维有限元模型的建立

基金项目:上海市重点科技支撑计划项目(编号:08411952400)

第一作者简介:男(1979-),硕士在读,研究方向:脊柱外科

电话:(021)81886805 E-mail:cjswater@qq.com

通讯作者:倪斌

健康男性志愿者 1 例,31 岁,身高 170cm,体重 64kg,X 线检查排除枕颈部畸形。应用 GE Lightspeed 64 排螺旋 CT 扫描枕骨底到 C3 椎体获得体层图像,扫描条件:140kV,200mA,层厚 0.625mm。以 512×512 像素 Dicom 格式保存。运用医学有限元建模软件 Simpleware 3.0 将 CT 数据转化为 STL 格式数据,通过 Geomagic 8.0 对数据中的图像进行修补、去噪、铺面并转化为 NURBS 曲面模型。最后运用有限元软件 Abaqus 6.9 进行有限元计算求解。

韧带的起止点根据相关文献设定^[1]。建立的韧带:横韧带、翼状韧带、齿状突尖韧带、覆膜、前纵韧带、后纵韧带、寰枕前膜、寰枕后膜、寰枕关节囊韧带、寰枢关节囊韧带、棘间韧带、棘上韧带(图 1)。采用文献^[2-4]中的载荷-变形曲线进行材料赋值,材料特性如图 2 所示。除横韧带以外其他所有韧带的载荷-变形曲线分为中性区、弹性区、塑形区以及破坏失效区。依据文献^[4],中性区采用抛物线方程进行拟合,弹性段采用直线方程拟合,同时忽略材料属性以及破坏失效区(图 2)。

松质骨、皮质骨采用均匀弹性各向材料,髓核和纤维环采用更能贴近椎间盘材料特性的超弹性材料来模拟(基于应变能理论的 Mooney-Rivlin 超弹材料公式,参数:C10,C01),同性材料横韧带采用正交各向异性材料,韧带参数来源于已发表的参考文献^[2-5](表 1~3)。

1.2 构建寰枢椎脱位有限元模型

选取单纯横韧带断裂而不伴有齿状突骨折的寰枢椎前脱位患者(男性,17 岁,颈部外伤后枕颈部疼痛不适半年),CT 示寰枢椎前脱位,寰齿前间

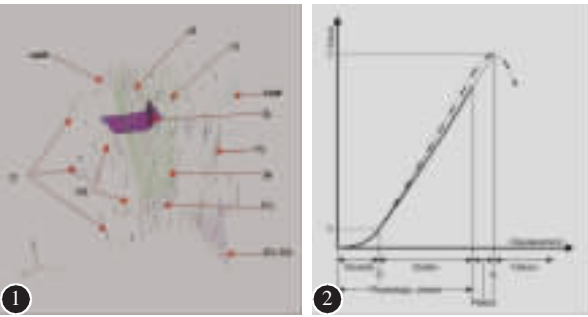


图 1 上颈椎有限元模型韧带连接(AAOM:寰枕前膜,PAOM:寰枕后膜,AP:齿状突尖韧带,AL:翼状韧带,TM:覆膜,TL:横韧带,ALL:前纵韧带,PLL:后纵韧带,LF:黄韧带,JC:关节囊关节韧带,ISL:棘突间韧带,SSL:棘上韧带)

图 2 韧带载荷变形曲线

距 7.5mm(图 3a),横韧带断裂。依据此病例寰齿间距在正常上颈椎三维有限模型(3b)上模拟寰枢椎脱位,去除齿状突后方横韧带模拟横韧带断裂(图 3c)。脱位后的关节囊、前纵韧带、棘间韧带的材料参数采取理想化的状态来模拟,调整前纵韧带、棘间韧带、棘上韧带及关节囊韧带的材料参数模拟韧带损伤。具体方法是通过更改载荷-变形曲线,以相同变形量的情况减半载荷量模拟韧带半数损伤(图 4)。建立单纯横韧带断裂而不伴齿状突骨折的寰枢椎前脱位有限元模型。

1.3 有限元模型验证和分析

在相同载荷下,将有限元模型上颈椎的活动度(ROM)与 Panjabi 等^[6,7]实验结果及近年已发表的上颈椎有限元模型^[8,9]结果进行比较来验证模型的有效性。

表 1 不同组织材料特性

	弹性模量(MPa)	泊松比
皮质骨	15000	0.2
松质骨	500	0.2
横韧带	E1=86,E2=6	0.019

表 2 椎间盘材料特性

	密度(kg/mm³)	泊松比	C10	C01
纤维环	1.00E-06	0.495	0.12	0.03
髓核	1.20E-06	0.45	0.18	0.045

表 3 韧带特性

	d _t (mm)	f _t (N)	d _n (mm)	f _n (N)	抛物线系数(α)
寰枕前膜	18.9	232	3.8	23.2	1.62
寰枕后膜	18.1	83	6.0	8.3	0.23
关节囊关节韧带					
C0-C1	9.9	320	3.3	32.0	2.94
C1-C2	9.3	314	4.7	31.4	1.45
C2-C3	9.0	210	3.0	21.0	2.33
前纵韧带	10.0	300	2.0	30.0	7.5
黄韧带					
C1-C2	9.6	111	3.2	11.1	1.08
C2-C3	6.0	90	2.0	9.0	2.25
齿状突尖韧带	8.0	214	1.6	21.4	8.36
翼状韧带	14.1	357	2.8	35.7	4.49
十字韧带	12.5	436	2.5	43.6	6.98
覆膜	11.9	76	4.0	7.6	0.48
后纵韧带	10.0	80	3.3	8.0	0.72
棘突间韧带	7.0	37	2.3	3.7	0.68

加载 1.5Nm 的扭矩,运用有限元软件 Abaqus 6.9 进行有限元计算,测量并比较相同载荷下正常上颈椎模型和寰枢椎脱位模型在屈、伸、侧屈、旋转等工况下寰枢椎的活动度(ROM)。

2 结果

建立的正常上颈椎有限元模型和单纯横韧带断裂而不伴齿状突骨折的寰枢椎前脱位有限元模型如图 5。正常上颈椎有限元模型共包含 206747 单元, 72500 个节点(图 5a、b)。与 Panjabi 等^[6,7]的

实验结果及 Brodin 等^[8]和 Zhang 等^[9]发表的上颈椎有限元模型结果比较,建立的正常模型满足有限元分析的几何相似性以及力学相似性要求(表4)。单纯横韧带断裂而不伴齿状突骨折的寰枢椎前脱位有限元模型外观逼真,几何相似性好(图5c、d)。在 1.5Nm 扭矩下正常上颈椎模型和寰枢椎脱位模型在屈、伸、侧屈、旋转等工况下的活动度(ROM)见表5。脱位模型的寰枢椎活动度(ROM)明显增大,其中前屈增加了 17.8°,后伸增加了 13.7°,侧屈和旋转也有不同程度的增大。

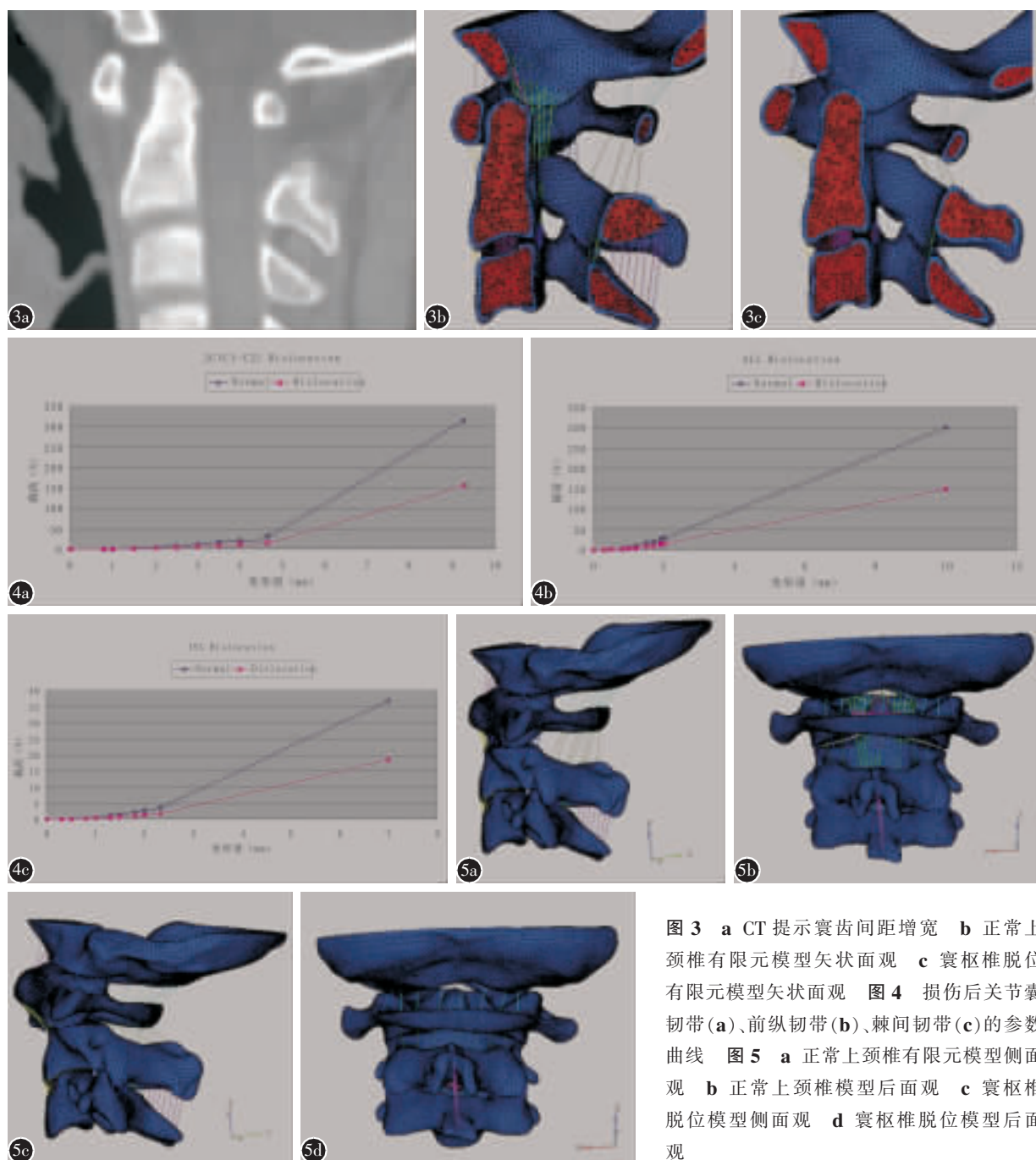


图3 a CT提示寰齿间距增宽 **b** 正常上颈椎有限元模型矢状面观 **c** 寰枢椎脱位有限元模型矢状面观 **图4** 损伤后关节囊韧带(**a**)、前纵韧带(**b**)、棘间韧带(**c**)的参数曲线 **图5 a** 正常上颈椎有限元模型侧面观 **b** 正常上颈椎模型后面观 **c** 寰枢椎脱位模型侧面观 **d** 寰枢椎脱位模型后面观

表 4 本研究正常上颈椎有限元模型与文献结果对比 (°)

		Panjabi 等 ^[7]	Brolin 等 ^[8]	Zhang 等 ^[9]	本研究
前屈	C0-1	14.4±3.2	18.2	14.5	10.5
	C1-2	12.7±3.2	11.3	15.0	17.0
后伸	C0-1	14.4±3.2	10.5	13.3	6.5
	C1-2	10.5±5.0	14.0	12.7	15.5
旋转	C0-1	3.3±2.3	6.1	8.5	4.6
	C1-2	37.4±9.0	23.3	30.6	27.0
侧屈	C0-1	5.6±3.0	3.0	5.5	5.6
	C1-2	12.6±7.0	4.0	5.9	5.4

注:旋转和侧屈取单侧结果

表 5 寰枢椎脱位有限元模型与正常有限元模型上颈椎活动度比较 (°)

	正常模型		脱位模型		活动度增加	
	C0-1	C1-2	C0-1	C1-2	C0-1	C1-2
前屈	10.5	17.0	8.1	34.8	-2.4	17.8
后伸	6.5	15.5	12.0	29.2	5.5	13.7
旋转	4.6	27.0	5.6	34.0	1.0	7.0
侧屈	5.6	5.4	5.7	12.4	0.1	7.0

注:旋转和侧屈取单侧结果

3 讨论

3.1 寰枢椎脱位有限元模型的建立及其特点

有限元方法是一种在工程学中广泛应用的数学物理方法。1972 年, Brekelmans 等^[10]将该方法引入生物力学领域。随着计算机技术的发展,有限元模型单元越分越细,建立的模型日趋逼真,越来越多地应用于人体生物力学分析,尤其是脊柱的生物力学分析。上颈椎的生物力学模型已趋于成熟, Brolin 等^[8]、Zhang 等^[9]及任中武等^[11]建立了包括横韧带、十字韧带纵束、翼状韧带、齿状突尖韧带、副韧带等结构在内的较为完善的上颈椎有限元模型,并且得到很好的验证。本研究通过参考上述模型的建模方法,建立了正常上颈椎有限元模型,对模型的分析结果与 Panjabi 等^[6,7]实验结果和 Brolin 等^[8]、Zhang 等^[9]建立的上颈椎有限模型分析结果相吻合。

Sasa 等^[12]在正常颈椎有限元模型的基础上,依据临床脱位病例,建立了 C6/7 脱位有限元模型,并进行了有限元分析。寰枢椎脱位的有限元研究国内外尚未见报道。本研究在经过验证有效的正常上颈椎有限元模型基础上,结合临床寰枢椎前脱位病例,建立了横韧带断裂而不伴齿状突骨折的寰枢椎前脱位有限元模型,模型外观逼真,几

何相似性好;能够较好地模拟临床个体脱位病例,从而进行术前生物力学分析,指导制定寰枢椎脱位的个体化治疗策略。模型可以反复调整,任意切割,通过调整模型几何及材料参数模拟不同类型的寰枢椎脱位,是对寰枢椎脱位生物力学分析的一个重要补充,可以克服尸体实验和动物实验取材难、费用高、可重复性差等缺点,做到个体化生物力学分析。同时有限元方法还可以研究局部和内部的反应,是其他实验技术无法获得的。

3.2 建立寰枢椎脱位有限元模型的意义

寰枢椎脱位类型较多,个体差异较大。本研究构建的寰枢椎脱位有限元模型是与临床实际病例相结合的个体化寰枢椎脱位模型。随着计算机和有限元软件的发展,利用此建模方法,有望在临床上快速构建寰枢椎脱位患者的个体化脱位模型。

寰枢椎脱位的治疗策略常常根据患者的临床症状、影像学表现、神经功能评估制定,寰枢关节的生物力学评估也是治疗策略制定的依据之一。但临床上对寰枢椎脱位患者,特别是急性损伤患者,进行动力位摄片极易导致医源性脊髓损伤,该检查往往是禁忌的。寰枢椎脱位模型的有限元分析不存在上述风险,可以提供有效的寰枢关节稳定性评估,为临床制定治疗策略提供参考。本研究选取了横韧带断裂而不伴齿状突骨折的寰枢椎前脱位病例,有限元分析结果提示此种脱位状况下,寰枢椎的活动度(ROM)明显增大,尤其是前屈增加了 17.8°,后伸增加了 13.7°,侧屈和旋转也有不同程度的增大,说明该病例稳定性差,对于该患者的治疗策略制定有一定的参考意义。此外,个体化寰枢椎脱位有限元模型还可以加载内固定模拟术后寰枢椎生物力学改变,对术后稳定性进行评估。

3.3 寰枢椎脱位模型构建中存在的问题

虽然理论上有限元方法在生物力学分析中可以取得很好的结果,但要想真正应用于寰枢椎脱位的临床治疗分析,仍有许多问题需要解决:(1)有限元模型能够反映某一个体,某一时刻,某一点的力学特性,但寰枢椎脱位的分型较多,脱位程度个体差异较大,韧带等软组织的损伤程度不同,有限元模型很难完全模拟实际情况^[13];(2)有限元模型还有待进一步完善,肌肉、椎体、韧带、椎间盘组织相当复杂,组织特性并非均一,本模型忽略了肌肉等软组织,对组织内部采取均一特性假定,与生理实际情况有一定差距。(3)由于有限元模型建立

和分析需要大量的数据运算,建立模型耗时较长,临床应用受到限制。随着计算机技术的发展和各类组织特性的认识提高,有限元模型会不断完善,有限元分析方法也会不断提高,这些问题有望得到解决。

4 参考文献

1. 贾连顺,袁文.现代脊柱外科学[M].北京:人民军医出版社,2007.21-24.
2. Carter DR, Hayes WC. The compressive behavior of bone as a two phase porous structure [J]. J Bone Joint Surg Am, 1977, 59(7):954-962.
3. Dvorack J, Schneider E, Saldinger P, et al. Biomechanics of the craniocervical region; the alar and transverse ligaments [J]. J Orthop Res, 1988, 6(3):452-461.
4. Yoganandan N, Kumaresan S, Pintar FA. Biomechanics of the cervical spine (Part 2): cervical spine soft tissue responses and biomechanical modeling [J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2001, 16(1):1-27.
5. Myklebust JB, Pintar F, Yoganandan N, et al. Tensile strength of spinal ligaments [J]. Spine, 1988, 13(5):526-531.
6. Panjabi M, Dvorak J, Crisco JJ, et al. Effects of alar ligament transection on upper cervical spine rotation [J]. J Orthop Res, 1991, 9(4):584-593.
7. Panjabi M, Dvorak J, Crisco JJ, et al. Flexion, extension, and lateral bending of the upper cervical spine in response to alar ligament transections [J]. J Spinal Disord, 1991, 4(2):157-167.
8. Brolin K, Halldin P. Development of a finite element model of the upper cervical spine and a parameter study of ligament characteristics [J]. Spine, 2004, 29(4):376-385.
9. 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.
10. Brekelmans WA, Poort HW, Slooff TJ. A new method to analyse the mechanical behaviour of skeletal parts [J]. Acta Orthop Scand, 1972, 43(5):301-317.
11. 任中武,倪斌,张美超,等.上颈椎三维非线性有限元模型的建立及其有效性验证[J].脊柱外科杂志,2007,5(3):159-161.
12. Sasa T, Yoshizumi Y, Imada K, et al. Cervical spondylolysis in a judo player; a case report and biomechanical analysis [J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2009, 129(4):559-567.
13. 陈强,侯铁胜,杨国标,等.全颈椎三维有限元模型的建立[J].第二军医大学学报,2006,27(5):554-555.

(收稿日期:2010-05-25 修回日期:2010-08-02)

(英文编审 蒋欣/郭万首)

(本文编辑 卢庆霞)

消息

四川省康复医学会脊柱脊髓损伤专业委员会成立

经过同仁们多年的努力,由全省各地市州、省市属医院推荐、大会选举、报学会批准,四川省康复医学会首届脊柱脊髓损伤专业委员会于2010年8月13日在成都成立了。名誉主任委员:胡云洲,主任委员:刘仲前,副主任委员:刘浩、王跃、王清、潘显明、侯伟光、蔚芃,共有59名委员。四川省康复医学会脊柱脊髓损伤专业委员会成立是四川省医疗康复界十分值得庆贺的大事!中国康复医学会脊柱脊髓损伤专业委员会名誉主任委员、中国脊柱脊髓损伤杂志主编、卫生部中日友好医院张光铂教授;北京大学第三医院王少波教授;解放军304医院李利教授;北京协和医院任玉珠教授;南京鼓楼医院邱勇教授;广州军区总医院尹庆水教授均应邀到会祝贺并作专题学术演讲。中国康复医学会脊柱脊髓损伤专业委员会主任委员侯树勋教授,因外出不能到会,特派李利教授并录制贺词前来祝贺。

四川省首届脊柱脊髓损伤学术会议同期举办,内容广泛,包括脊柱创伤、脊柱结核、脊柱肿瘤、脊柱退变性疾病、脊柱畸形、脊柱微创和基础研究等各各方面。除省外特邀专家在大会做了精彩的学术演讲外,省内专家共选出13篇优秀论文和几篇有特色的专题在大会做了交流,获得了200余与会专家的好评,认为此次会议反映了该领域的学术新信息,新技术,新知识,新理念。同时使首届专业委员会委员受到鼓舞,纷纷表示今后要带领本地区从事脊柱脊髓损伤的医护人员努力钻研业务,积极参加学术交流,在工作中要开拓创新,进一步推动和提高我省脊柱脊髓损伤专业的基础研究、临床诊治和康复治疗水平,更好地为四川省广大伤病员服务。