

颈椎后凸畸形山羊动物模型：力学失衡及异常应力☆

方加虎¹, 贾连顺², 周许辉², 宋李军¹, 李翔¹, 王以进³

Mechanical imbalances and abnormal stress in a goat model of cervical kyphosis

Fang Jia-hu¹, Jia Lian-shun², Zhou Xu-hui², Song Li-jun¹, Li Xiang¹, Wang Yi-jin³

Abstract

BACKGROUND: The incidence of cervical kyphosis occurs with bio-mechanical behavior changes. However, bio-mechanics research of animal model of cervical kyphosis has been rarely reported.

OBJECTIVE: To analyze biomechanical changes in a goat model of cervical kyphosis.

METHODS: To simulate the formation of cervical kyphosis cause, a goat model of cervical kyphosis was made. Biomechanics of fresh cervical specimens of the cervical kyphosis goats and normal goats was compared to measure three-dimensional range of motion (ROM) and bending stiffness.

RESULTS AND CONCLUSION: Compared with normal specimens, the deformity range of cervical kyphosis goats was from C₂ to C₅, and their ROM in the C_{2/3} to C_{4/5} segment was obviously reduced. ROM differences between two groups in C_{5/6} segment was significantly reduced, similar in the C_{6/7} segment, even slight greater than normal specimens. The rotation motion was significantly reduced, nearly limited. The bending stiffness of the kyphosis group was increased significantly in the C_{2/3} to C_{4/5} segment, while almost the same as normal group in the C_{5/6} and C_{6/7} segments. With the formation of kyphosis, mechanical imbalances and the presence of abnormal stress in the deformity range resulted in abnormal cervical joint fusion, leading to cervical biomechanical changes.

¹Jiangsu Provincial People's Hospital, Nanjing 210029, Jiangsu Province, China; ²Changzheng Hospital, Second Military Medical University of Chinese PLA, Shanghai 200003, China; ³Shanghai Institute of Biomechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 201800, China

Fang JH, Jia LS, Zhou XH, Song LJ, Li X, Wang YJ. Mechanical imbalances and abnormal stress in a goat model of cervical kyphosis. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu. 2010;14(13): 2411-2415. [http://www.crter.cn http://en.zglckf.com]

Fang Jia-hu☆, Doctor, Attending physician, Jiangsu Provincial People's Hospital, Nanjing 210029, Jiangsu Province, China fjh4508@163.com

Correspondence to: Li Xiang, Chief professor, Associate professor, Jiangsu Provincial People's Hospital, Nanjing 210029, Jiangsu Province, China lixiang2003@medmail.com.cn

Received: 2009-12-01 Accepted: 2010-01-05

摘要

背景: 颈椎后凸畸形发生的同时其生物力学行为也发生变化, 但关于颈椎后凸畸形动物模型的生物力学研究少见文献报道。

目的: 分析颈椎后凸畸形山羊动物模型的生物力学变化。

方法: 通过外加因素, 模拟颈椎后凸畸形的形成病因, 构建颈椎后凸畸形山羊的动物模型, 并对颈椎后凸畸形山羊和正常山羊的新鲜颈椎标本作生物力学的对比研究, 测量其三维运动范围和弯曲刚度。

结果与结论: 与正常山羊颈椎标本比较, 颈椎后凸畸形山羊后凸范围在 C₂₋₅, 颈椎后凸畸形山羊在 C_{2/3}~C_{4/5} 节段的三维运动范围明显减小, 而在 C_{5/6} 节段此差明显缩小, 在 C_{6/7} 节段基本无差别, 甚至会略大于正常山羊颈椎三维运动范围, 在屈伸、左右侧屈、左右旋转运动中, 旋转运动下降最多, 旋转活动基本被限制; 颈椎后凸畸形山羊在 C_{2/3}~C_{4/5} 节段的弯曲刚度明显增大, 而在 C_{5/6} 和 C_{6/7} 节段两者较接近。反映了在施加实验因素后, 羊的颈椎出现了生物力学的改变, 羊颈椎在出现后凸畸形后变得僵硬了。结果提示后颈椎后凸畸形形成后, 后凸节段颈椎的力学失衡和异常应力的存在造成颈椎关节的异常融合, 导致了颈椎生物力学特征的改变。

关键词: 颈椎; 后凸畸形; 生物力学; 动物模型; 应力

doi:10.3969/j.issn.1673-8225.2010.13.033

方加虎, 贾连顺, 周许辉, 宋李军, 李翔, 王以进. 颈椎后凸畸形山羊动物模型: 力学失衡及异常应力[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2010, 14(13):2411-2415. [http://www.crter.org http://cn.zglckf.com]

0 引言

颈椎后凸畸形多由于多个节段颈椎生理前凸丢失、颈椎后伸力矩变为前屈力矩, 并继发有椎体前缘高度减小、关节突关节脱位、颈椎不稳, 可伴有局部椎体后移、颈椎管狭窄及邻近节段退变的症候群^[1-2]。颈椎后凸畸形临床危害性大, 严重危害人类健康^[3-9]。颈椎后凸畸形发生后其生物力学行为也发生变化, 为研究其生物力学行为的变化, 本文通过模拟后凸畸形的形成病因, 成功建立了山羊的颈椎后凸畸形模型, 并对动物模型进行生物力学研究, 现

将研究的结果报道如下。

1 材料和方法

设计: 重复对照试验设计。

时间及地点: 于2007-04/2008-02在上海交通大学农学院, 上海大学上海生物力学工程研究所完成。

材料: 新鲜颈椎标本(C₂~T₁节段)取自上海交通大学农学院提供9月龄山羊, 体质量22~29 kg, 雌性, 分为后凸畸形组(n=28)与正常对照组(n=7)。实验过程中对动物处置符合动物伦理学标准。

¹ 江苏省人民医院, 江苏省南京市 210029; ² 解放军第二军医大学附属长征医院, 上海市 200003; ³ 上海大学上海生物力学工程研究所, 上海市 201800

方加虎, 男, 1974 年生, 江苏省南京市人, 汉族, 2008 年解放军第二军医大学附属长征医院毕业, 博士, 主治医师, 主要从事脊柱外科和创伤研究。fjh4508@163.com

通讯作者: 李翔, 主任医师, 副教授, 江苏省人民医院, 江苏省南京市 210029 lixiang2003@medmail.com.cn

中图分类号: R394.2
文献标识码: B
文章编号: 1673-8225 (2010)13-02411-05

收稿日期: 2009-12-01
修回日期: 2010-01-05
(20091201003/
GW · A)

万能材料试验机: 型号 WE-10A, 出厂编号: W1-31057, 上海红山实验机厂生产, 见图 1 所示。

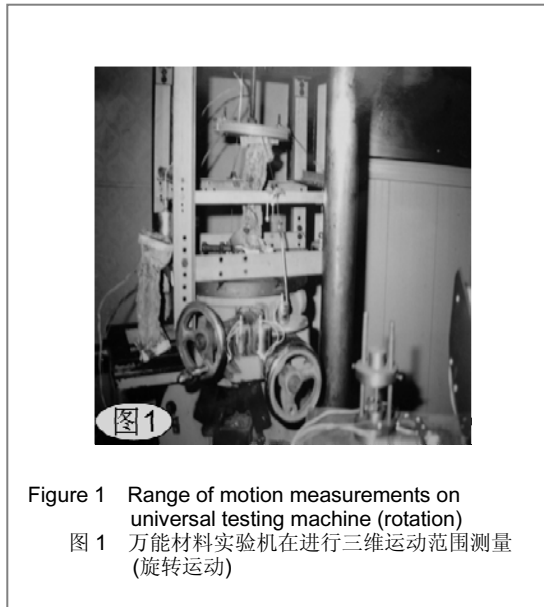


Figure 1 Range of motion measurements on universal testing machine (rotation)
图 1 万能材料试验机在进行三维运动范围测量 (旋转运动)

实验方法:

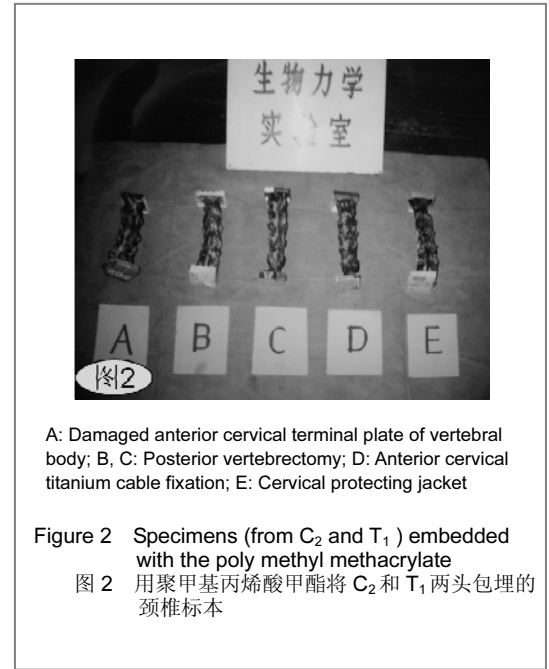
动物模型制作: 通过人为的外加因素, 模拟颈椎后凸畸形的形成病因, 将正常山羊的颈椎造成后凸畸形。

造成后凸畸形采用的方法有: 通过颈椎前路手术破坏椎体终板 (C_{3/4}、C_{4/5}、C_{5/6} 上下终板的前 1/3) 7 只; 通过颈椎后路手术将椎板 (C₃、C₄、C₅) 及后结构韧带切除 7 只; 颈椎前路椎体钛缆固定 7 只, 通过自行设计的颈椎护套将羊的颈椎固定于羊的前腿, 使羊长期处于低头状态 7 只。

将上述所有的山羊 28 只和正常对照组的山羊 7 只, 在同一生长环境下饲养五六个月后, 经摄片证实颈椎后凸畸形已形成, 颈椎活动受限后, 选择后凸畸形羊 5 只和正常羊 5 只, 通过肌肉注射苯巴比妥处死动物, 留取新鲜颈椎标本。

将新鲜标本取材后用双层保鲜塑料袋封闭, 置于 -20 °C 恒温冰柜冷冻保存, 在该温度下保存标本、骨与韧带的生物力学特性无改变^[10-15]。

试验材料与标本获取: 采用上述动物模型及正常对照组新鲜山羊颈椎 (C₂~T₁) 标本, 实验前将标本移至常温下解冻 5 h, 在生理盐水中浸泡, 保证标本不失水。标本取材后两端锯平用聚甲基丙烯酸甲酯将 C₂ 和 T₁ 两头包埋, 制成完整颈椎实验标本如图 2 所示, 在万能材料试验机上测试。



A: Damaged anterior cervical terminal plate of vertebral body; B, C: Posterior vertebrectomy; D: Anterior cervical titanium cable fixation; E: Cervical protecting jacket

Figure 2 Specimens (from C₂ and T₁) embedded with the poly methyl methacrylate
图 2 用聚甲基丙烯酸甲酯将 C₂ 和 T₁ 两头包埋的颈椎标本

实验力学模型与实测: 本实验为非破坏方式下进行力学测试。实验机能模拟颈椎在体的生理运动特性, 既能对颈椎施加载荷和力偶矩, 又不限制颈椎标本承载后的自由运动。测试标本前, 首先标定实验机的三维坐标, 即标志点的空间位置然后将标本下端的包埋块固定在实验台基座上, 上端与加载盘相连, 施加砝码, 对颈椎予加载 15 N 以模拟生理的头颅质量, 然后加载力偶矩 2 N · m, 通过控制力矩的方向, 可产生前屈/后伸, 左/右侧屈, 左右旋转 6 个自由度的生理运动^[3]。在颈椎定位标志点, 通过它的运动就能准确地测量出颈椎的节段运动, 重复多次循环测量。根据刚体运动学理论, 3 个不共线标志的空间位置即可确定椎体的空间位置和取向, 由此可直接计算出羊颈椎被测试节段之间运动范围的角位移。首先进行正常羊颈椎标本三维运动范围的测量, 然后进行实验组后凸畸形羊颈椎的三维运动范围测量。本实验除进行羊颈椎的三维运动测量外, 还进行弯曲刚度测量。羊颈椎的弯曲刚度测量, 是根据颈椎在弯曲力矩的作用下, 颈椎节段的移位形成的弯曲变形角来测量的。根据力学上的定义, 弯曲刚度的大小, 是指颈椎抵抗弯曲变形的能力的大小。弯曲刚度测量是测量羊颈椎节段纵向和横向的线位移, 然后根据数据进行处理, 计算出羊颈椎正常标本和后凸畸形组标本的弯曲刚度^[5-6]。

主要观察指标: 颈椎标本三维运动范围及弯曲刚度检测。

设计、实施、评估者: 由全体作者共同完成。

统计学分析: 两组数据应用单因素的方差分析进行统计, 行方差齐性检验方差不齐数据用两样本的非参统计方法完成统计, 所有数据都经SPSS 10统计软件处理。统计处理由第一、六作者完成。

2 结果

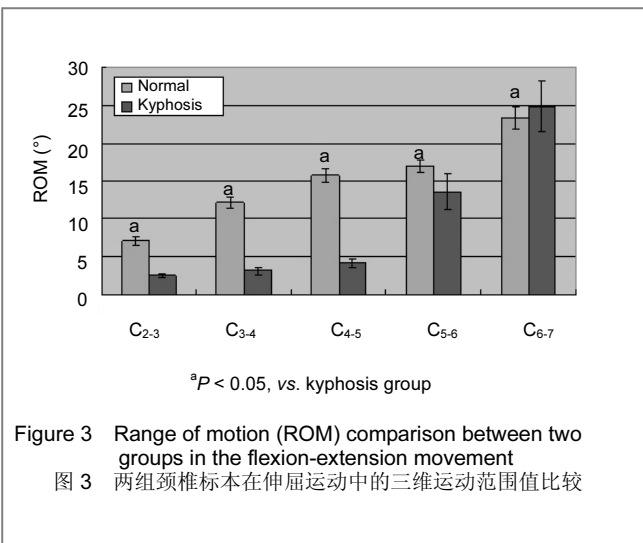
2.1 山羊颈椎标本三维运动范围测量结果 见表1。

表 1 山羊颈椎标本三维运动范围测量结果
Table 1 Measurement results of range of motion of goat cervical spines ($\bar{x}\pm s$, degrees)

Group	Range of motion	C _{2/3}	C _{3/4}	C _{4/5}
Normal	Flexion-extension (Flex-ex)	7.12±0.53	12.13±0.71	15.71±0.93
	Lateral bending (BL)	7.13±0.41	8.41±0.35	11.74±0.80
	Rotation	22.22±1.24	23.91±1.25	23.34±1.31
Kyphosis	Flex-ex	2.53±0.28	3.16±0.44	4.13±0.59
	BL	2.55±0.26	2.79±0.46	3.13±0.63
	Rotation	4.73±0.22	5.72±0.46	5.89±0.34

Group	Range of motion	C _{5/6}	C _{6/7}
Normal	Flexion-extension (Flex-ex)	16.90±0.79	23.36±1.43
	Lateral bending (BL)	19.62±1.16	16.71±1.31
	Rotation	28.77±1.54	33.98±2.04
Kyphosis	Flex-ex	13.54±2.31	24.84±3.33
	BL	14.97±2.16	19.37±4.58
	Rotation	15.76±1.29	34.43±2.25

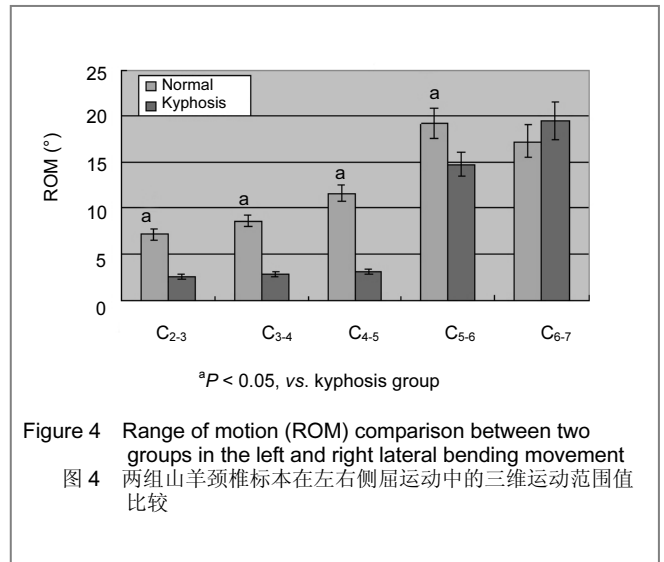
屈伸状态下的三维运动范围见图3。



颈椎在屈伸运动中, 后凸畸形组在C₂₋₃、C₃₋₄、C₄₋₅节段的三位运动范围值与正常对照组比较起来有大幅

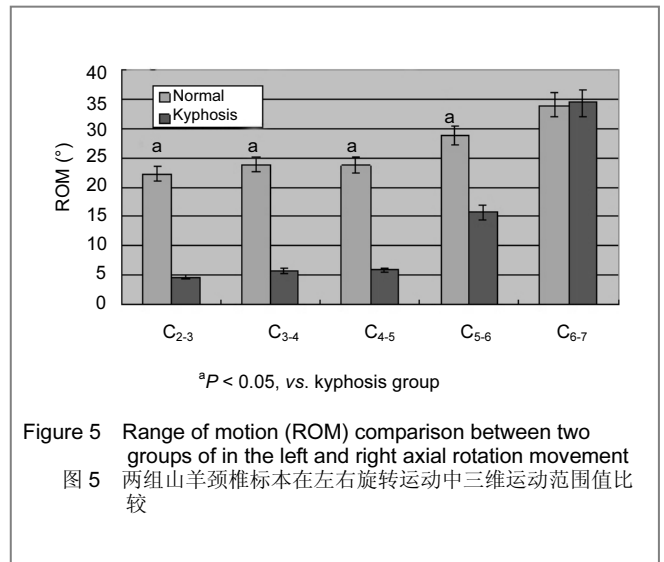
度的下降, 以C₃~C₄节段下降的明显, 到C₅₋₆节段两者差距已明显缩小, 到C_{6/7}节段后凸畸形的屈伸三维运动范围大于正常组, 各节段两组数据比较, 统计显示差异有显著性意义 (C₂₋₃: *Z* = -4.67, *P* < 0.05; C₃₋₄: *F* = 1 839, *P* < 0.05; C₄₋₅: *F* = 1 739, *P* < 0.05; C₅₋₆: *Z* = -3.34, *P* < 0.05; C₆₋₇: *Z* = -2.26, *P* < 0.05)。

左右侧屈状态下的三维运动范围见图4。



在左右侧屈运动中, 与正常对照组相比, 后凸畸形组C₂₋₃、C₃₋₄、C₄₋₅节段的三维运动范围值也明显减小, C₅₋₆节段较小幅度的下降, C₆₋₇节段略大于正常组, 两组数据统计显示C₂₋₃、C₃₋₄、C₄₋₅、C₅₋₆差异有显著性意义, 而C₆₋₇节段未见统计学差异(C₂₋₃: *F* = 1 321, *P* < 0.05; C₃₋₄: *F* = 1 431, *P* < 0.05; C₄₋₅: *F* = 1 080, *P* < 0.05; C₅₋₆: *Z* = -4.34, *P* < 0.05; C₆₋₇: *Z* = -0.89, *P* > 0.05)。

左右旋转状态下的三维运动范围见图5。



在左右旋转运动中, 与正常对照组相比, 后凸畸形组C₂~C₃、C₃~C₄、C₄~C₅节段的三维运动范围值减小最为明显, 旋转活动基本被限制, C₅~C₆较小幅度的下降, C₆~C₇节段略大于正常组, 两组数据C₂~C₃、C₃~C₄、C₄~C₅、C₅~C₆差异有显著性意义, 而C₆~C₇节段未见统计学差异(C₂~C₃: Z=-4.66, P < 0.05; C₃~C₄: Z=-4.67, P < 0.05; C₄~C₅: Z=-4.66, P < 0.05; C₅~C₆: F=627, P < 0.05; C₆~C₇: F=0.30, P > 0.05)。后凸畸形组羊在屈伸, 左右侧屈, 左右旋转的运动中, C₅~C₆及C₆~C₇节段的三维运动范围值与正常值基本相近。

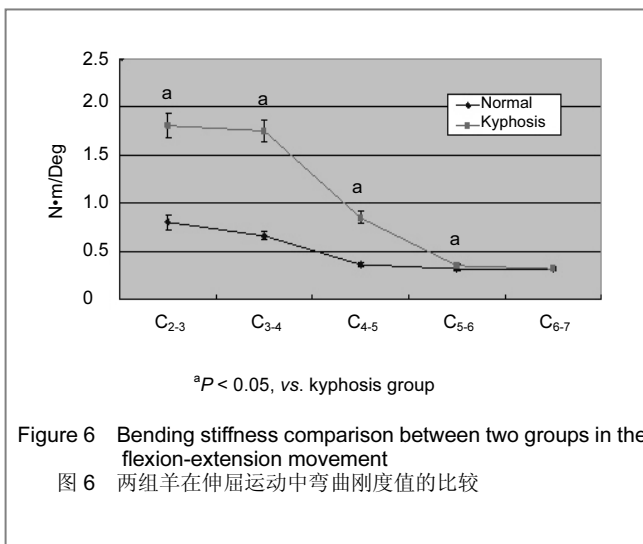
2.2 山羊颈椎标本弯曲刚度值的测量结果 见表2。

表2 两组山羊颈椎标本弯曲刚度值测量值
Table 2 Bending stiffness of goat cervical spines (x±s, N·m/Deg)

Group	Range of motion	C _{2/3}	C _{3/4}	C _{4/5}
Normal	Flexion-extension (Flex-ex)	0.80±0.08	0.66±0.04	0.36±0.02
	Lateral bending (BL)	1.38±0.08	1.26±0.07	0.91±0.07
	Rotation	0.49±0.04	0.48±0.03	0.47±0.03
Kyphosis	Flex-ex	1.81±0.12	1.75±0.11	0.85±0.06
	BL	2.82±0.16	2.84±0.17	1.82±0.11
	Rotation	1.89±0.11	1.91±0.10	1.88±0.10

Group	Range of motion	C _{5/6}	C _{6/7}
Normal	Flexion-extension (Flex-ex)	0.32±0.02	0.32±0.02
	Lateral bending (BL)	0.46±0.02	0.51±0.03
	Rotation	0.50±0.03	0.52±0.03
Kyphosis	Flex-ex	0.35±0.02	0.32±0.02
	BL	0.51±0.03	0.46±0.03
	Rotation	0.50±0.04	0.48±0.03

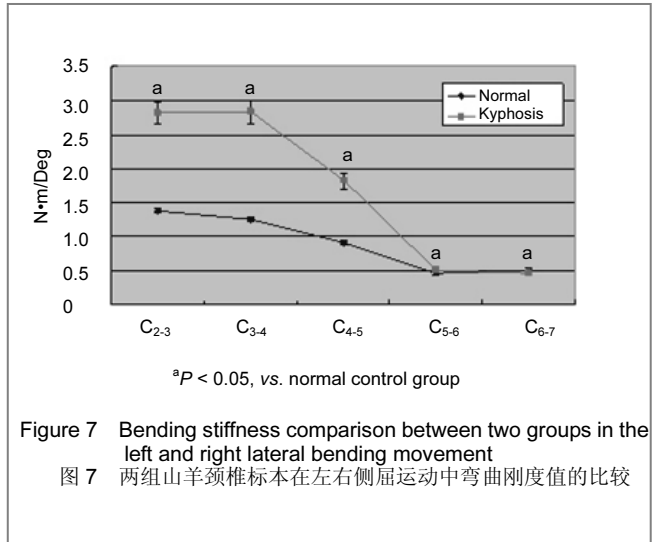
屈伸状态下的弯曲刚度见图6。



颈椎在屈伸运动中, 后凸畸形组的弯曲刚度有所增

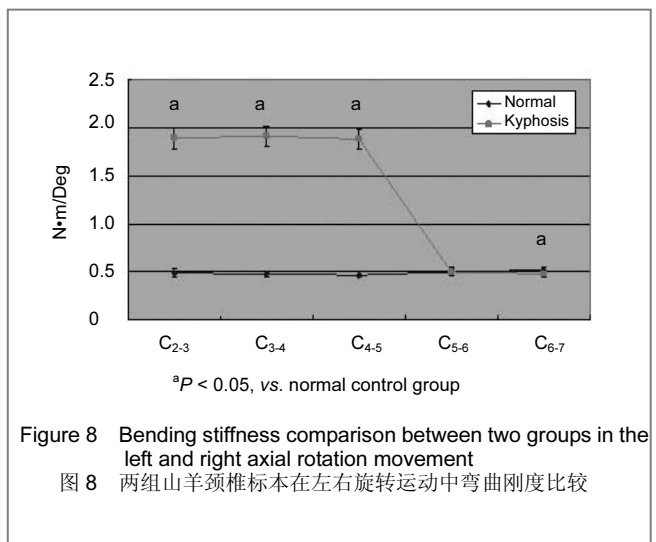
加, 在C₂~C₃、C₃~C₄、C₄~C₅节段的弯曲刚度值与正常对照组比较起来有大幅度的上升, 到C₅~C₆节段两者差距已明显缩小, 到C₆~C₇节段后凸畸形的屈伸弯曲刚度只略大于正常对照组, 两组数据统计显示C₂~C₃、C₃~C₄、C₄~C₅、C₅~C₆差异有显著性意义, 而C₆~C₇节段未见统计学差异(C₂~C₃: F=756, P < 0.05; C₃~C₄: Z=-4.67, P < 0.05; C₄~C₅: Z=-4.68, P < 0.05; C₅~C₆: Z=-3.55, P < 0.05; C₆~C₇: F=2.09, P > 0.05)。

左右侧屈状态下的弯曲刚度见图7。



在左右侧屈运动中, 与正常对照组比较, 后凸畸形组的C₂~C₃、C₃~C₄、C₄~C₅节段的弯曲刚度值也明显增大, C₅~C₆节段只是较小幅度的增大, C₆~C₇节段略大于正常组, 两组数据统计显示有统计学差异(C₂~C₃: Z=-4.66, P < 0.05; C₃~C₄: Z=-4.67, P < 0.05; C₄~C₅: F=869, P < 0.05; C₅~C₆: F=33.16, P < 0.05; C₆~C₇: F=18.19, P < 0.05)。

左右旋转状态下的弯曲刚度见图8。



在左右旋转运动中, 后凸畸形组C₂~C₃、C₃~C₄、

C₄~C₅节段的弯曲刚度值增大较为明显, C₅₋₆的弯曲刚度和正常对照组基本相同, 后凸畸形组C_{6/7}节段的弯曲刚度略小于正常组, 两组数据显示C₂₋₃、C₃₋₄、C₄₋₅、C₆₋₇差异有显著性意义, 而C₅₋₆节段未见统计学差异(C₂₋₃: $Z=-4.67$, $P < 0.05$; C₃₋₄: $Z=-4.68$, $P < 0.05$; C₄₋₅: $Z=-4.68$, $P < 0.05$; C₅₋₆: $F=0.15$, $P > 0.05$; C₆₋₇: $F=13.13$, $P < 0.05$).

3 讨论

脊柱外科的许多研究如融合、退变性研究、内置物的应用等, 不能在体外模型中完成, 只能借助于动物, 在体内模型中完成。由于羊颈椎与人颈椎的诸多相似性, 羊的颈椎模型已被广泛地应用到生物力学的研究中^[3, 14, 16-18], 本实验要研究颈椎后凸畸形的生物力学改变, 也要借助于山羊动物模型。关于颈椎后凸畸形动物模型的生物力学研究少见文献报道。

本实验采用3月大的幼年山羊作为研究对象, 采用不同的实验方法生长6月后, 形成颈椎后凸畸形后, 进行生物力学测试, 后凸畸形羊在不同状态下的三维运动范围和正常组羊比较有如下特点: 后凸畸形组羊在C_{2/3}~C_{4/5}节段的三维运动范围明显的减小, 而在C_{5/6}节段此差距明显缩小, 在C_{6/7}节段基本无差别, 甚至有会略大于正常组的三维运动范围, 在屈伸、左右侧屈、左右旋转运动中, 旋转运动下降最多, 后凸畸形组旋转活动基本被限制。在不同运动的弯曲刚度测量中, 和正常组相比, 后凸畸形组有如下的特点: C_{2/3}~C_{4/5}节段的弯曲刚度明显增大, 而在C_{5/6}和C_{6/7}节段两者较接近。反映了在施加实验因素后, 羊的颈椎出现了生物力学的改变, 羊的颈椎在出现后凸畸形后, 变得僵硬了。在后凸畸形组中, 有椎板切除组也有同样的变化这与一些研究的结果不一致^[4, 8-9](一些研究结果认为椎板切除后颈椎的运动幅度比正常要增大, 是由于关节突关节、棘突的切除, 甚至关节囊的切除增加颈椎的不稳定性), 但本实验中, 椎板切除节段后凸节段的三维运动范围是减少了, 原因有二, 其一本组羊在手术中并未破坏羊的关节突关节, 其二在形成后凸畸形的过程中, 为了代偿后结构缺失造成的颈椎不稳, 关节出现硬化、间隙变小、甚至融合, 这是后凸畸形的临床病例中常会见到的现象^[7, 18]。

颈椎生物力学的稳定性是由颈椎骨性结构完整, 和肌肉软组织和韧带力量的平衡共同决定的。颈椎前方的椎体和椎间盘结构主要抵抗压力负荷, 后方的关节突关节囊韧带、棘间韧带、黄韧带和肌肉软组织具有抵抗牵张性张力的作用。实验因素使颈椎在矢状面无法保持平衡, 颈椎生理前凸度出现减少, 出现直颈颈椎, 甚至后凸畸形。颈椎后凸畸形的形成, 刚开始是可复性的, 渐渐发展, 随着椎体楔形改变, 椎间融合, 以及后结

构的异常骨化导致关节突关节脱位融合、关节囊骨化、黄韧带和棘间韧带骨化, 形成了僵硬性的颈椎后凸畸形^[8, 16-18]。至于C_{6/7}节段活动增大可能与颈椎代偿活动有关, 因为本实验中, 后凸畸形形成的节段是C₂₋₅, 为代偿出现的颈椎后凸畸形, 临近节段的运动会增大, 这也是为什么有些颈椎后凸畸形患者会出现鹅颈畸形^[9]。本实验中, 在C_{5/6}和C_{6/7}节段, 颈椎后凸畸形组和正常组对照组的测量均值相差甚小, 但有部分比较在统计学上仍有差异, 可能是由于本实验标本量较小的缘故。

4 参考文献

- [1] Daivajna S, Jones A, Hossein Mehdi SM. Surgical management of severe cervical kyphosis with myelopathy in osteogenesis imperfecta: a case report. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2005; 30(7):191-194.
- [2] Albert TJ, Vaccara A. Post-laminectomy kyphosis. *Spine*. 1998; 23(27):38-45.
- [3] Kandziara F, Pflugmacher R, Scholz M, et al. Comparison between sheep and human cervical spines: an anatomic, radiographic, bone mineral density, and biomechanical study. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2001; 26(9):1028-1037.
- [4] Cusick JF, Pintar FA, Yoganandan N. Biomechanical alterations induced by multilevel cervical laminectomy. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1995; 20(22):2392-2397.
- [5] Panjabi M, Dvorak J, Duranceau J, et al. Three-dimensional movements of the upper cervical spine. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1988; 13(7):726-730.
- [6] Wang YJ, Wang JL. Beijing: People's Military Medical Press. 1989: 106-110.
王以进, 王介麟. 骨科生物力学[M]. 北京: 人民军医出版社, 1989: 106-110.
- [7] Iwasaki M, Yamamoto T, Miyauchi A, et al. Cervical kyphosis: predictive factors for progression of kyphosis and myelopathy. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2002; 27(13): 1419-1425.
- [8] Kaptain GJ, Simmons NE, Reptogle RE, et al. Incidence and outcome of kyphotic deformity following laminectomy for cervical spondylolytic myelopathy. *J Neurosurg*. 2000; 93(Spine 2):199-204.
- [9] Sim F, Svien HJ, Bickel WH, et al. Swan-neck deformity following extensive cervical laminectomy. *J Bone Joint Surg Am*. 1974; 56(13): 564-580.
- [10] Sran MM, Khan KM, Zhu Q, et al. Posteroanterior stiffness predicts sagittal plane midthoracic range of motion and three-dimensional flexibility in cadaveric spine segments. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2005; 20(8):806-812.
- [11] Dath R, Ebinasan AD, Porter KM, et al. Anatomical measurements of porcine lumbar vertebrae. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2007; 22(5): 607-613.
- [12] Wang Y, Ren XL, Ma HL, et al. *Shengwu Yixue Gongcheng yu Linchuang*. 2009; 13(2):85-88.
王 渊, 任龙喜, 马红磊, 等. 单、双开门颈椎板成形术后重建韧带复合体部分生物力学特性的比较研究[J]. *生物医学工程与临床*, 2009, 13(2):85-88.
- [13] He D, Han X, Tao JF, et al. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu*. 2008; 12(22): 4229-4232.
何达, 韩晓, 陶剑锋, 等. 颈椎人工间盘置换与颈椎内固定置入对相邻节段退变的生物力学影响[J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2008, 12(22): 4229-4232.
- [14] Hu N, Cunningham BW, McAfee PC, et al. Porous coated motion cervical disc replacement: a biomechanical, histomorphometric, and biologic wear analysis in a caprine model. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2006; 31(15):1666-1673.
- [15] Wang YJ. *Zhongguo Jiaoxing Waikexue*. 2005; 13(1): 69-71.
王以进. 骨科生物力学实验统计和实施[J]. *中国矫形外科杂志*, 2005, 13(1):69-71.
- [16] Zhou XH, Fang JH, Jia LS, et al. Clinical significance of cervical vertebral flexion and extension spatial alignment changes. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2009; 34(1):E21-26.
- [17] Fang JH, Zhou XH, Yuan W, et al. *Zhongguo Jizhu Jisui Zazhi*. 2009; 19(8):601-604.
方加虎, 周许辉, 袁文, 等. 颈椎后凸畸形患者影像学测量指标与临床症状的相关性研究[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2009, 19(8): 601-604.
- [18] Zhou XH, Fang JH, Jia LS, et al. *Zhonghua Chuangshang Zazhi*. 2007; 23(9):650-653.
周许辉, 方加虎, 贾连顺, 等. 严重创伤性颈椎后凸畸形的治疗策略[J]. *中华创伤杂志*, 2007, 23(9): 650-653.