

不对称力学负荷对大鼠椎体骨微结构的影响

戴哲浩¹, 吕国华¹, 王 冰¹, 康意军¹, 陆凌云^{1,2}(1 中南大学湘雅二医院脊柱外科 410011 长沙市; 2 厦门市第五医院骨二科
厦门大学附属第一医院同民分院 361101 厦门市)

【摘要】目的:探讨不对称力学负荷对大鼠椎体骨小梁微结构形态学参数的影响。**方法:**40 只 SD 大鼠随机分为双足鼠组和拴系-双足鼠组。通过截去双前肢和尾巴建立双足大鼠模型;拴系-双足鼠组在其基础上,利用丝线拴系左侧肩胛下角与同侧骨盆髂骨翼,完成造模。术后第 8 周末将拴系缝线剪断。观察 12 周,每间隔 4 周摄脊柱全长正位 X 线片,观察各组大鼠侧凸发生情况;术后 12 周处死大鼠,测量顶椎旋转度,获取顶椎(拴系-双足鼠组)或 L1 椎体(双足鼠组)行显微 CT 扫描,观察椎体骨微结构变化情况。**结果:**双足鼠组中无脊柱侧凸发生,拴系-双足鼠组大鼠均发生侧凸,顶椎均位于 T12 或 L1,其术后 Cobb 角为 0°,术后 4 周时为 23.5°±4.2°(16°~31°),术后 8 周时为 40.6°±9.4°(28°~63°),三个观察点之间的结果比较均有显著性差异($P<0.05$)。术后 12 周时 Cobb 角为 37.8°±9.9°(26°~50°),与术后 8 周比较无显著性差异($P>0.05$)。顶椎旋转度为 6.0°±2.2°(3.5°~9.0°)。双足鼠组两侧各个参数之间均无显著性差异($P>0.05$)。拴系-双足鼠组大鼠顶椎的凹侧体积骨密度(volumetric bone mineral density, vBMD)、骨体积分数(bone volume fraction, bone volume/total volume, BV/TV)、骨小梁厚度(trabecular thickness, Tb.Th)数值明显高于凸侧,骨小梁间隔(trabecular separation, Tb.Sp)数值显著低于凸侧,而骨小梁数量(trabecular number, Tb.N)无显著性差异($P>0.05$)。拴系-双足鼠组的凸侧 BMD 及凹侧 vBMD、BV/TV、Tb.Th 数值显著高于双足鼠组,凹侧 Tb.Sp 也显著小于双足鼠组。**结论:**4 周龄双足 SD 大鼠通过 8 周的拴系即可形成 Cobb 角>10°的稳定的结构性侧凸畸形。脊柱侧凸时,骨骼的重建能力提高了凹侧骨骼强度,从而在某种程度上阻止了侧凸畸形的进展。

【关键词】脊柱侧凸;双足大鼠;不对称力;骨微结构

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2015.03.12

中图分类号:R318.01, Q954.54 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2015)-03-0259-06

Scoliosis model in an asymmetric force bipedal rat and bone micro-architecture adaptations of vertebrae/DAI Zhehao, LÜ Guohua, WANG Bing, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2015, 25(3): 259-263, 286

【Abstract】Objectives: To investigate the effects of the asymmetrical loading on the rat vertebral bone structure of morphological parameters of trabecula bone. **Methods:** 40 SD rats were divided into 2 groups: bipedal rat group and tether-bipedal rat group. Bipedal rat model was made by amputation of the forelimbs and tail. The left inferior angle of scapula to the ipsilateral bony pelvis was sutured in tether-bipedal rat group after amputation of the forelimbs and tail. After 8 weeks, the tethering suture was released. Spinal deformity was documented by serial X-ray examinations at an interval of 4 weeks. After sacrifice, the rotation angle of apical vertebra was measured and Micro CT was used to analyze the bone micro-architecture. **Results:** All rats in tether-bipedal rat group developed scoliosis and no scoliosis was detected in bipedal rat group. The average initial Cobb angle was 0° immediately after the operation and progressed to an average of 23.5°±4.2°(16°~31°) after 4 weeks, 40.6°±9.4°(28°~63°) after 8 weeks, 37.8°±9.9°(26°~50°) after 12 weeks. The average rotation angle of apical vertebra was 6.0°±2.2°(3.5°~9.0°). There was no difference in vBMD, BV/TV, Tb.Th, Tb.N or Tb.Sp between both sides of vertebra in bipedal rat group. The vBMD, BV/TV and Tb.Th on the

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:81371919);湖南省科学技术厅科技计划项目(编号:2012WK3039);福建省医学创新课题(编号:2014-CXB-51)

第一作者简介:男(1982-),主治医师,博士后,研究方向:代谢性骨病和骨肿瘤

电话:(0731)85295125 E-mail:f2daizhehao@hotmail.com

通讯作者:王冰 E-mail:bingwang20021972@aliyun.com

concave side significantly increased, and Tb.Sp significantly decreased compared with that on the convex side in tether-bipedal rat group. The vBMD, BV/TV and Tb.Th on the concave side and vBMD on the convex side in tether-bipedal rat group significantly increased compared with those of the bipedal rat group.

Conclusions: Suturing the left inferior angle of scapula to the ipsilateral bony pelvis in bipedal rats can establish the scoliosis model successfully. Bone micro-architecture on the concave side of apical vertebra is remodeling, which can help to prevent the progress of scoliosis.

[Key words] Scoliosis; Bipedal rat; Asymmetric load; Bone micro-architecture

[Author's address] Department of Spine Surgery, the Second Xiangya Hospital of Central Southern University, Changsha, 410011, China

研究表明^[1,2],在特发性脊柱侧凸(idiopathic scoliosis, IS)畸形形成和进展过程中,脊柱生物力学异常起到重要的作用。其中,椎体骨小梁的结构特性是维持脊柱稳定性的关键因素^[3]。然而,目前有关脊柱侧凸椎体骨微结构的研究不多,且多为二维平面上的描述性研究或者关节突骨结构的定量性研究,未能真正反映脊柱骨小梁结构在异常应力下的三维结构改变^[4-6]。因此,本研究拟利用不对称力拴系在双足大鼠中诱发脊柱侧凸动物模型,并对侧凸凸侧与凹侧的椎体骨小梁进行三维结构观察,通过与非侧凸大鼠椎体骨小梁对照,探讨椎体骨微结构形态学参数与侧凸发生发展之间的关系。

1 材料和方法

1.1 实验动物分组

健康 3 周龄 Sprague-Dawley (SD) 大鼠 40 只,雌雄各半(中国科学院上海实验动物中心提供,SPF 级,NO.430470040)。适应性生长 1 周后,按体重由轻到重编号,利用随机数字表随机分为两组:双足鼠组和拴系-双足鼠组。每组 20 只,雌雄各半。造模前摄片均未发现任何脊柱侧凸或其他脊柱畸形。

1.2 动物模型的建立

1.2.1 双足鼠组 1%戊巴比妥腹腔内注射麻醉(40mg/kg)成功后,取俯卧位,切口周围去毛、络合碘消毒。在盂肱关节处切开皮肤,钝性游离皮下,在腋部的上肢血管神经束进行缝扎。结扎止血,行盂肱关节离断,缝合肌肉、皮肤。再在尾巴根部进行环行切开皮肤,在截断处缝扎,然后截除尾部,缝合皮肤。

1.2.2 拴系-双足鼠组 麻醉成功后,于左侧肩胛下角处,横行切开皮肤,长约 0.5cm,钝性分离皮下组织及肩胛骨处肌肉,游离肩胛骨下角。再在

平行于两骨盆髂骨翼水平处,横行切开皮肤,长约 2cm,皮下组织行钝性分离,找到同侧骨盆髂骨翼。用无菌尺测量肩胛下角到同侧骨盆髂骨翼的距离,并做记录。在同侧髂后上棘处用缝针带 7 号丝线穿过骨盆髂骨翼,拉紧缝线,做“8”字缝合(防止脱落),然后用止血钳钝性分离骨盆处与肩胛下角处皮下组织,用止血钳将结扎在骨盆髂骨翼的缝线通过皮下牵拉到肩胛骨上切口处,然后将缝线贯穿肩胛骨,调整缝线后,当肩胛下角与同侧骨盆髂骨翼距离与原来所测距离相同时做“8”字缝扎(防止脱落),4 号缝线缝合皮肤。然后离断双上肢及尾部。术后 8 周末,将拴系缝线剪断。

1.2.3 术后饲养与观察 术后在普通饲养箱内饲养,自由进食进水。术后 3d,转入大饲养箱内饲养。饲养箱尽量长和高,随着大鼠的生长,不断抬高食物和水,促使大鼠保持站立及行走状态。术后 8 周,在麻醉下将拴系缝线剪断,同样的条件下再喂养 4 周。

1.3 观察方法

术后即刻(造模后)、术后 4 周、术后 8 周、术后 12 周(处死前),摄脊柱全长正位 X 线片,测定 Cobb 角,观察脊柱侧凸发生和进展情况。摄片时,头颅固定架固定 SD 大鼠头部,头部抬高 30°,使躯干在重力作用下处于一定的牵引状态,避免麻醉造成的体位性侧凸(图 1)。摄片参数:电压 41kV,电流 2.80mAs,焦点距离 1m,时间 0.4s。侧凸评价标准为:Cobb 角>10°。

末次摄片时记录拴系-双足鼠组各大鼠顶椎,腹腔内注射过量戊巴比妥处死后,将其俯卧位平置于操作台上,剪开背部皮肤,平行于顶椎棘突刺入一枚大头针,再在顶椎下一椎体棘突刺入另一枚大头针,测量其夹角,即顶椎旋转度。

获取拴系-双足鼠组大鼠侧凸顶椎,因其顶椎位于 T12 或 L1,所以取双足鼠组大鼠 L1 椎体

对比。应用 GE Explore Locus SP 型显微 CT(GE Health Care Co, London, Ont)行离体骨三维扫描。扫描参数为管电压 80kV, 电流 80 μ A, 360°旋转, 扫描时间约为 180min 平均 4 帧, 角度增益 0.4°, 曝光时间 3000ms, 各向同性分辨率 8.0 $\times$ 8.0 $\times$ 8.0 μ m 体素。以 Fluro 方式将离体骨完全选入扫描窗内, 并同时扫描随机器所附标准体模, 校正 CT 值。扫描完成后, 手动校正旋转中心及 CT 值, 以 41.0 $\times$ 41.0 $\times$ 41.0 μ m 体素的各向同性分辨率完成扫描标本的整体结构重建。椎体松质骨分析时, 先在重建图像中, 以椎体后缘中点和椎体前缘中点做连线, 将椎体的凸侧和凹侧进行区分, 以便分别测定。沿 Z 轴(从椎体上缘向椎体下缘)观察不同横断面内的椎体情况, 选取椎体与椎弓根连接起始的平面以下, 层厚 2.0mm 的骨组织为感兴趣区域行 8.0 $\times$ 8.0 $\times$ 8.0 μ m 体素三维重组, 以计算机自动生成阈值, 提取图像信息, 完成图像二值化, 继而选定 ROI 内松质骨呈现三维可视化(图 2)。采用体视学算法计算椎体松质骨微结构参数, 包括体积骨密度(volumetric BMD, vBMD)、骨体积分数(bone volume fraction, bone volume/total volume, BV/TV)、骨小梁数量(trabecular number, Th.N)、骨小梁厚度(trabecular thickness, Tb.Th)、骨小梁间隔(trabecular separation, Th.Sp)。

1.4 统计学处理

用 SPSS 16.0 统计软件进行统计分析, 各指标以均数 $\pm$ 标准差($\bar{x}\pm s$)表示, 组间比较采用两独立样本 *T* 检验, 凸凹侧比较采用配对 *T* 检验, 组内不同时间点之间比较采用单因素方差分析, 采用 LSD-*t* 检验。 *P*<0.05 表示差异有显著性。

2 结果

2.1 一般情况及体重变化

术后第 1 天, 两组大鼠均少动, 少食, 伤口有少量渗血。术后第 3 天, 大鼠活动如常, 正常饮食。术后第 10 天, 切口已愈合良好。两组均无大鼠死亡。随着增龄, 两组大鼠的体重逐渐增加(图 3)。术后 4 周、术后 8 周、术后 12 周, 双足鼠组大鼠体重较术后即刻分别增加 66.87%、140.21%、176.67%; 拴系-双足鼠组分别为 71.32%、147.19%、204.21%; 同组 4、8、12 周之间有统计学差异(*P*<0.05)。两组体重增速基本相当, 同时点两组之间无统计学差异(*P*>0.05)。

2.2 Cobb 角及顶椎旋转度

双足鼠组中无脊柱侧凸发生, 无椎体旋转和楔形变。拴系-双足鼠组 20 只大鼠均发生侧凸, 右侧凸 4 例; 左侧凸 16 例; 双侧凸 3 例。顶椎均位于 T12 或 L1, 其术后 Cobb 角为 0°, 术后 4 周时为 23.5° $\pm$ 4.2°(16°~31°), 术后 8 周时为 40.6° $\pm$ 9.4°(28°~63°), 三个观察点之间的结果比较均有显著性差异(*P*<0.05)。术后 8 周, 将拴系缝线剪断, 术后 12 周时(即拴系缝线剪断后 4 周)Cobb 角为 37.8° $\pm$ 9.9°(26°~50°), 术后 8 周、12 周的 Cobb 角之间无差异显著性(*P*>0.05)。顶椎旋转度为 6.0° $\pm$ 2.2°(3.5°~9.0°)。

2.3 显微 CT 测量顶椎骨微结构参数

两组大鼠顶椎或 L1 两侧骨微结构参数的变化情况见表 1。双足鼠组两侧各个参数之间均无显著性差异(*P*>0.05)。拴系-双足鼠组大鼠顶椎的凹侧 BMD、BV/TV、Tb.Th 数值明显高于凸侧, Th.Sp 数值明显低于凸侧, 而 Tb.N 无显著性差异(*P*>0.05)。拴系-双足鼠组的凸侧 BMD 明显高于双足鼠组, 拴系-双足鼠组的凹侧 BMD、BV/TV、Tb.Th 数值明显高于双足鼠组, 而且 Tb.Sp 也明显小于双足鼠组(图 4)。

3 讨论

IS 是以冠状面上脊柱一个或数个节段向侧方弯曲为主要特征, 常伴有矢状面上的异常前后凸和横断面上的旋转畸形。目前, 脊柱侧凸动物模型主要分为两大类: 一类是干预动物的中枢神经系统, 造成体内褪黑素缺陷, 间接制造出脊柱侧凸动物, 但是临床上并不是所有 IS 患者均会存在褪黑素降低^[7]; 另一类是通过关节突切除、肋骨切除、椎旁肌切断、肋间神经切断和脊髓神经后根切断、椎体楔形切除、生长终板阻滞或相邻椎体固定等方法影响动物脊柱生长, 直接制造出脊柱侧凸动物。然而, 这类模型采用损伤脊柱旁结构引起侧凸, 所以从病因学角度上讲, 很难模仿 IS 的改变。为此, 我们利用肩胛下角与同侧骨盆翼拴系在双足大鼠中诱发脊柱侧凸, 结果显示, 该模型简单易行且避免了脊柱及椎旁结构的损伤, 双足鼠组中无脊柱侧凸的发生、无椎体旋转和楔形变, 而拴系-双足鼠组 20 只大鼠均发生了侧凸, 其既有冠状面的侧凸畸形, 又有横断面的脊椎旋转畸形, 这与人类 IS 形态特征极其相似。而且两组大鼠随着

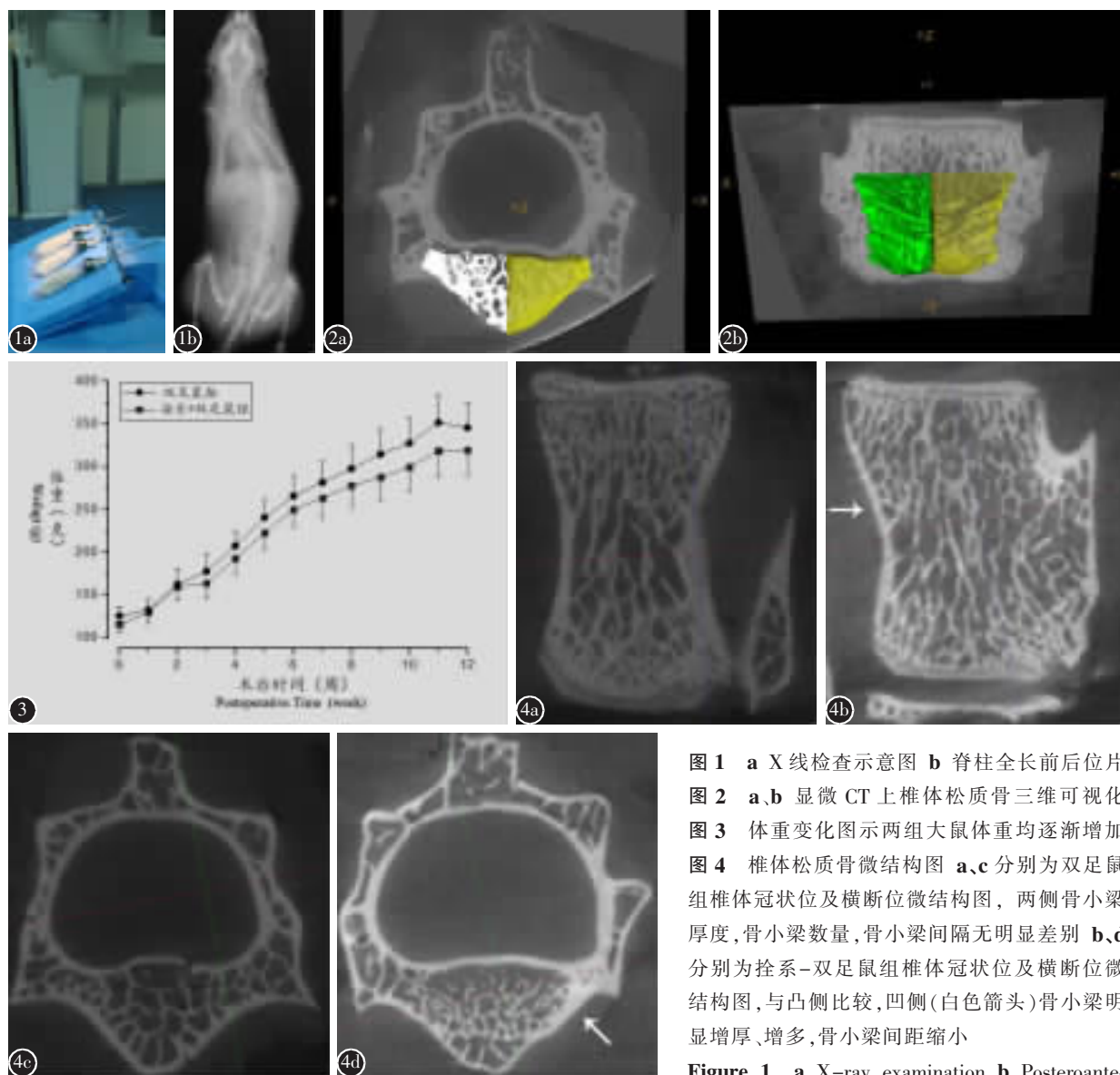


图 1 a X 线检查示意图 b 脊柱全长前后位片
图 2 a、b 显微 CT 上椎体松质骨三维可视化
图 3 体重变化图示两组大鼠体重均逐渐增加
图 4 椎体松质骨微结构图 a、c 分别为双足鼠组椎体冠状位及横断位微结构图, 两侧骨小梁厚度, 骨小梁数量, 骨小梁间隔无明显差别 b、d 分别为拴系-双足鼠组椎体冠状位及横断位微结构图, 与凸侧比较, 凹侧(白色箭头)骨小梁明显增厚、增多, 骨小梁间距缩小

Figure 1 a X-ray examination b Posteroanterior radiographs of the spine Figure 2 a, b

Three-dimensional micro CT reconstructions of vertebrae Figure 3 The body weight increased gradually in both groups Figure 4 Two-dimensional micro CT reconstructions of vertebrae. There was no difference in Tb.Th, Tb.N, Tb.Sp between both side of vertebrae on coronal(a) and axial(c) two-dimensional reconstruction images in bipedal rat group. The Tb.Th on the concave side(white arrow) significantly increased, and Tb.Sp significantly decreased compared with that on the convex side on coronal(b) and axial(d) two-dimensional reconstruction images in tether-bipedal rat group

增龄, 体重逐渐增加, 但是相同时间点两组之间无统计学差异, 进一步说明拴系模型对于大鼠生长发育无明显影响。

IS 病因尚未明了, 生长发育异常、神经肌肉性因素、结缔组织异常、生长不对称、基因表达异常等原因被认为与 IS 发病有关^[8,9]。但是, 各种因素所致脊柱生物力学异常则是 IS 畸形进展更为直接的诱因^[1,2]。IS 治疗(外固定支具和手术治疗)的

根本原则也主要是恢复脊柱力学平衡。目前, 关于脊柱生物力学异常所造成的脊柱侧凸进展研究, 多集中在主弯曲凹侧与凸侧小关节结构变化上。Shea 等^[4]采用电子显微技术观察特发性脊柱侧凸患者顶椎区关节突皮质骨, 发现脊柱侧凸凹侧关节突皮质骨厚度较凸侧厚而且孔隙较小。杨晓恩等^[5]的研究进一步表明特发性脊柱侧凸患者凹侧关节突骨小梁间距更小, 骨小梁更粗, 从而可使脊

表 1 椎体两侧骨微结构参数
Table 1 Microstructural parameters of the both side of the vertebrae in two groups

	双足鼠组 Bipedal rat		拴系双足鼠组 Tether-bipedal rat	
	凹侧 Concave	凸侧 Convex	凹侧 Concave	凸侧 Convex
体积骨密度 vBMD($\mu\text{g}/\text{mm}^3$)	230.0 $\pm$ 11.9	230.7 $\pm$ 10.2	271.5 $\pm$ 12.9	252.3 $\pm$ 12.0 ^①
骨体积分 BV/TV(%)	35.3 $\pm$ 4.5	34.7 $\pm$ 4.4	42.1 $\pm$ 3.2	36.8 $\pm$ 4.5 ^①
骨小梁厚度 Tb.Th(μm)	83.2 $\pm$ 9.0	83.6 $\pm$ 9.3	101.3 $\pm$ 10.6	88.9 $\pm$ 12.2 ^①
骨小梁数量 Tb.N(/mm)	4.1 $\pm$ 0.4	4.2 $\pm$ 0.5	4.3 $\pm$ 0.4	4.2 $\pm$ 0.5
骨小梁间隔 Tb.Sp(μm)	160.3 $\pm$ 18.4	159.2 $\pm$ 16.8	136.6 $\pm$ 13.5	152.3 $\pm$ 12.7 ^①

注:①与同组凹侧比较 $P<0.05$

Note: ①Compared with the concave of same group, $P<0.05$

椎楔形变的速度变缓。但以上研究不足以真实反应小关节与侧凸进展明显关联性。从维持脊柱稳定性角度来讲,椎体骨小梁的结构特性及三维空间构造变化应是畸形进展的更为关键的因素^[3]。然而,相关的研究较为缺乏。为此,本研究应用分辨率达 $6\mu\text{m}$ 的显微 CT 技术,通过三维图像重建,定量测定了标本的骨小梁三维空间的结构特性。研究发现,顶椎凹侧与凸侧椎体内骨小梁微结构存在显著差异,凹侧骨密度明显增高、骨量增多、骨小梁变厚且骨小梁间距减小,与凸侧相比存在显著性差异,以上参数均提示,脊柱侧凸顶椎凹侧骨小梁结构较凸侧更加坚强。为进一步判断差异是否由于凹侧骨小梁增生、凸侧骨小梁丢失,或者是两者同时发生改变而引起,笔者将拴系-双足鼠组顶椎凸/凹侧骨小梁三维微结构参数与双足鼠组相应椎体两侧进行比较,拴系-双足鼠组的凸侧 BMD 明显高于双足鼠组,而且其凹侧 BMD、BV/TV、Tb.Th 数值明显高于双足鼠组,而且 Tb.Sp 也明显小于双足鼠组。以上结果说明,凹侧和凸侧均是顺应各自的微环境改变来自我调整骨微结构,且以凹侧骨小梁增生为主。与 Nordin 等^[10]的理论较为一致。

Hueter-Volkman 定律和 Wolff 定律是骨骼自我调控的主要机理。根据 Hueter-Volkman 定律,骨骺所受压力增加,骨的生长就会受到抑制;骨骺所受压力降低,骨的生长就会加速。对于脊柱侧凸而言,凹侧软骨终板承受较大的压应力,凸侧承受较大的张应力,从而造成两侧软骨终板内在

结构及成骨能力的差异,最终造成凹侧椎体生长迟缓,凸侧椎体生长加速,致使侧凸进展^[11]。但是, Hueter-Volkman 定律无法合理解释脊柱侧凸患者凹侧椎弓根更短更致密、椎板更厚、小关节更坚固的现象。在本研究中,我们同样观察到顶椎凹侧骨小梁结构较凸侧更加坚强,另外,拴系-双足鼠组的凸侧 BMD 明显高于双足鼠组,推测该现象是由于不对称的力学因素出现后,根据 Hueter-Volkman 定律凸侧软骨生长板在张应力作用下骨建造水平提高,加速了新骨形成从而导致相应的 BMD 增高及凸侧椎体高度增加,而凹侧软骨生长板在压应力作用下骨建造水平降低,新骨形成不够,愈发不能有效抵抗压应力,造成骨小梁微骨折、凹侧椎体高度进一步降低,从而出现椎体楔形变。但是,骨小梁微骨折的出现,逐渐激活了骨重建机制,使凹侧的脊椎变得更为坚强,从而防止椎体楔形变和脊柱侧凸的进行性加重,这一过程与 Wolff 定律(骨骼的功能是承受活动期间骨组织的机械应变)相符。在本研究中,拴系缝线剪断 4 周后, Cobb 角没有进行性增大,这可能与术后 8 周也就是大鼠 3 月龄时进入成熟期,生长潜能低下相关,软骨生长板的骨建造作用逐步消失,而骨重建机制下重塑的凹侧骨小梁开始拥有足够的强度对抗不对称力学因素。这也解释了为何特发性脊柱侧凸在青春期生长高峰期进展尤为迅速,而一旦椎体骨骺闭合发育成熟,脊柱侧凸进展的风险大大降低。

总之,本研究证实了 4 周龄双足 SD 大鼠通过 8 周的拴系即可形成 Cobb 角 $>10^\circ$ 的稳定的结构性侧凸畸形。同时提示,脊柱侧凸时骨骼的重建能力提高了凹侧骨骼强度,在某种程度上能够阻止脊柱侧凸进展。为今后在脊柱侧凸快速进展期采取某种干预措施,增强骨骼强度控制脊柱侧凸进展提供依据。

4 参考文献

1. Braun JT, Hoffman M, Akyuz E, et al. Mechanical modulation of vertebral growth in the fusionless treatment of progressive scoliosis in an experimental model[J]. Spine, 2006, 31(12): 1314-1320.
2. Huynh AM, Aubin CE, Rajwani T, et al. Pedicle growth asymmetry as a cause of adolescent idiopathic scoliosis: a biomechanical study[J]. Eur Spine J, 2007, 16(4): 523-529.

(下转第 286 页)

6. Nardi P, Cabezas D, Rea G, et al. Aperius PercLID stand alone interspinous system for the treatment of degenerative lumbar stenosis: experience on 152 cases[J]. J Spinal Disord Tech, 2010, 23(3): 203–207.
 7. Surace MF, Fagetti A, Fozzato S, et al. Lumbar spinal stenosis treatment with Aperius perclid interspinous system[J]. Eur Spine J, 2012, 21(Suppl 1): 69–74.
 8. Van Meirhaeghe J, Fransen P, Morelli D, et al. Clinical evaluation of the preliminary safety and effectiveness of a minimally invasive interspinous process device APERIUS(R) in degenerative lumbar spinal stenosis with symptomatic neurogenic intermittent claudication[J]. Eur Spine J, 2012, 21(12): 2565–2572.
 9. Kantelhardt SR, Török E, Gempt J, et al. Safety and efficacy of a new percutaneously implantable interspinous process device[J]. Acta Neurochir(Wien), 2010, 152(11): 1961–1967.
 10. Hrabálek L, Wanek T, Machac J, et al. Percutaneous interspinous dynamic stabilization(in-space) in patients with degenerative disease of the lumbosacral spine: a prospective study[J]. Rozhl Chir, 2012, 91(6): 311–316.
 11. 张加芳, 郑召民, Larry Khoo, 等. 经皮置入式腰椎棘突间撑开器的生物力学测试[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2011, 21(2): 129–132.
 12. 王会. 腰椎棘突间应用解剖学研究及经皮置入式棘突间动态稳定器的设计[D]. 蚌埠医学院, 2012.
 13. 李照文. 一种新型脊柱动态内固定系统的理论验证[J]. 中国组织工程研究, 2014, 18(4): 619–624.
 14. Smith ZA, Armin S, Raphael D, et al. A minimally invasive technique for percutaneous lumbar facet augmentation: technical description of a novel device [J]. Surg Neurol Int, 2011, 11(2): 165–172.
 15. Sangiorgio SN, Sheikh H, Borkowski SL, et al. Comparison of three posterior dynamic stabilization devices [J]. Spine, 2011, 36(19): 1251–1258.
 16. Masala S, Tarantino U, Nano G, et al. Lumbar spinal stenosis minimally invasive treatment with bilateral transpedicular facet augmentation system [J]. Cardiovasc Intervent Radiol, 2013, 36(3): 738–747.
 17. 陈远明, 靳安民, 樊帆, 等. 可经皮置入的动态腰椎内固定器的设计与初步测试[J]. 中国临床解剖学杂志, 2014, 32(4): 458–461.
 18. Sapkas GS, Themistocleous GS, Mavrogenis AF, et al. Stabilization of the lumbar spine using the dynamic neutralization system[J]. Orthopedics, 2007, 30(10): 859–865.
 19. 朱小广, 丁亮华, 姜世涛, 等. 腰椎后路经椎弓根动态固定系统研究新进展[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2011, 21(3): 252–255.
 20. Li HP, Li F, Guan K, et al. Dynesys dynamic stabilization system for the lumbar degenerative disease: a preliminary report from China[J]. Chin Med J(Engl), 2013, 126(22): 4265–4269.
 21. 侯煜, 田少辉, 许磊, 等. 腰椎动态稳定重建系统在下腰椎退行性病变手术治疗中的应用[J]. 山东医药, 2014, 54(27): 76–77.
 22. 侯煜, 卜宏建, 田少辉, 等. 微创技术置入腰椎动态稳定重建系统治疗椎间融合术后相邻节段退变的临床评价[J]. 河北医药, 2014, 36(20): 3097–3099.
 23. 朱奔敏, 张锴, 王衡, 等. 椎间孔镜联合经皮微创棘突间动态固定治疗腰椎间盘突出的短期疗效[J]. 中国矫形外科杂志, 2013, 21(11): 1153–1156.
- (收稿日期: 2014-12-07 末次修回日期: 2015-01-16)
(本文编辑 卢庆霞)

(上接第 263 页)

3. Chen H, Shoumura S, Emura S, et al. Regional variations of vertebral trabecular bone microstructure with age and gender [J]. Osteoporos Int, 2008, 19(10): 1473–1483.
 4. Shea KG, Ford T, Bloebaum RD, et al. A comparison of the microarchitectural bone adaptations of the concave and convex thoracic spinal facets in idiopathic scoliosis [J]. J Bone Joint Surg Am, 2004, 86-A(5): 1000–1006.
 5. 杨晓恩, 朱锋, 邱勇, 等. 特发性脊柱侧凸患者脊柱畸形段凸侧及凹侧关节突松质骨三维微结构比较 [J]. 中华外科杂志, 2005, 43(12): 777–780.
 6. Cheng JC, Tang SP, Guo X, et al. Osteopenia in adolescent idiopathic scoliosis: a histomorphometric study[J]. Spine, 2001, 26(3): E19–23.
 7. Machida M, Dubousset J, Yamada T, et al. Serum melatonin levels in adolescent idiopathic scoliosis prediction and prevention for curve progression—a prospective study [J]. Pineal Res, 2009, 46(3): 344–348.
 8. Qiu XS, Tang NL, Yeung HY. Lack of association between the promoter polymorphism of the MTNR1A gene and adolescent idiopathic scoliosis[J]. Spine, 2008, 33(20): 2204–2207.
 9. He Y, Qiu Y, Zhu F, et al. Quantitative analysis of types I and II collagen in the disc annulus in adolescent idiopathic scoliosis[J]. Stud Health Technol Inform, 2006, 123: 123–128.
 10. Nordin M, Frankel VH. Basic biomechanics of the musculoskeletal system[M]. Philadelphia: Lea and Febiger, 1989. 31.
 11. 王守丰, 邱勇, 王斌, 等. 青少年特发性脊柱侧凸患者凸凹侧椎体生长板组织形态学研究[J]. 中国矫形外科杂志, 2008, 16(19): 1499–1502.
- (收稿日期: 2015-01-04 修回日期: 2015-03-11)
(英文编审 蒋欣/贾丹彤)
(本文编辑 彭向峰)