

文章编号:1004-7220(2013)01-0079-06

颞下颌关节三维动态磁共振成像研究及生物力学分析

艾松涛^a, 唐为卿^a, 戴尅戎^b, 陶晓峰^a, 范新东^a, 余强^a, 刘玉^a

(上海交通大学医学院附属第九人民医院 a.放射科; b.骨科, 上海 200011)

摘要: **目的** 通过在多层面二维动态 MR 成像上获取颞下颌关节组织的运动数据,构建颞下颌关节的三维动态模型,并进行初步生物力学分析。**方法** MRI 检查采用 GE Signa 1.5T TwinSpeed 超导型磁共振扫描仪。选取 2 例无症状男性志愿者行颞下颌关节 MRI 检查,将图像数据导入 Mimics 软件,构建颞下颌关节的三维模型,动态分析张口幅度和关节盘横径的量化关系。**结果** 建立的颞下颌关节三维动态模型清晰显示三维动态盘髁关系及关节盘在动态过程中的形态变化;志愿者 1 张口/关节盘横径拟合直线为: $y = -0.03x + 14.44$, 相关系数 $R^2 = 0.591$, 志愿者 2 相关拟合直线为: $y = -0.061x + 13.48$, 相关系数 $R^2 = 0.306$, 志愿者张口位置与关节盘横径变化具有直线趋势,关节盘横径随着张口幅度的加大而呈现减小的趋势,颞下颌关节盘对于髁突的包绕程度与张口幅度呈反比。颞下颌关节盘纵径厚度在张口活动中后带外份及中带内份的变化幅度最大。**结论** 通过颞下颌关节二维动态 MR 成像数据可构建三维动态模型立体动态地观察颞下颌关节运动,可直观、准确显示颞下颌关节盘髁关系,可作为颞下颌关节二维静态 MR 成像的有益补充,弥补常规 MRI 检查的局限。

关键词: 颞下颌关节; 磁共振成像; 三维重建; 生物力学; 计算机辅助分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Dynamic MRI study on temporomandibular joint and biomechanical analysis

AI Song-tao^a, TANG Wei-qing^a, DAI Ke-rong^b, FAN Xin-dong^a, TAO Xiao-feng^a, YU Qiang^a, LIU Yu^a (*a. Department of Radiology; b. Department of Orthopaedics, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiaotong University School of Medicine, Shanghai 200011, China*)

Abstract: Objective To establish a three-dimensional (3D) dynamic model of temporomandibular joint (TMJ) based on data collected from the TMJ movement with multi-level two-dimensional (2D) dynamic magnetic resonance imaging (MRI) and make biomechanical analysis. **Methods** GE Signa 1.5T TwinSpeed superconductive magnetic resonance scanner was used. TMJs of 2 asymptomatic male volunteers were chosen to be examined with MRI. All the images were imported to the Mimics software. 3D dynamic model of the TMJ was built, and the relationship between the magnitude of mouth opening and the disc transverse diameter was analyzed using linear fitting. **Results** The 3D dynamic model of TMJ was successfully established. The disc-condyle relationship and the dynamic morphological change of the TMJ disc were showed clearly in this model. The linear fitting equations were $y = -0.03x + 14.44$ ($R^2 = 0.591$) and $y = -0.061x + 13.48$ ($R^2 = 0.306$) from volunteers 1 and 2, respectively. A linear trend was observed regarding the relationship between mouth opening position and articular disc transverse diameter. The contact of the condyle surrounded by the TMJ disc varied inversely with the magnitude of mouth opening; the longitudinal diameter of TMJ disc changed along with the magnitude of mouth opening. In the process of mouth opening, the thickest longitudinal diameter of the joint disc was at the middle part of post-zone. The most remarkable changes of the longitudinal diameter of TMJ disc were found at the outer part of the post-zone and the inner part of the mid-zone. **Conclusions** The 3D dynamic model of TMJ was built successfully

收稿日期:2012-05-19; 修回日期:2012-06-26

基金项目:上海交通大学口腔医学院医学教育研究项目(2011),上海交通大学医学院医学教育研究项目(2011)。

通信作者:陶晓峰,主任医师,E-mail: cjr.taoxiaofeng@vip.163.com。

to observe the TMJ movement dynamically with 2D dynamic MRI. The model showed the disc-condyle relationship intuitively and precisely, and could be used as an alternative method to make up for the shortage of the 2D static MRI.

Key words: Temporomandibular joint (TMJ); Magnetic resonance imaging (MRI); Three-dimensional reconstruction; Biomechanics; Computer-aided analysis

颞下颌关节紊乱综合征(temporomandibular disorders, TMD)的发生机理尚不明确,以往有颌面因素学说、精神心理因素学说、创伤因素学说、自身免疫因素学说、解剖因素学说等解释;但现在的观点认为,单一一种学说无法完全解释TMD的发生,故支持TMD是由于多种因素造成的这一观点^[1-2]。目前有许多种检查方法可以帮助诊断TMD,在诸多检查之中,磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)已被认为是评价颞下颌关节的“金标准”^[3-4]。常规MRI检查亦存在局限性,不能直观显示关节盘旋转移位、关节盘畸形、轻度关节盘移位,可能造成漏诊,使得临床医师根据常规MRI图像做出明确诊断具有困难。理论上,通过颞下颌关节(temporomandibular joint, TMJ)二维动态MR成像数据的获得可以构建其三维动态模型,运用三维有限元分析方法^[5-6],尤其是TMJ内关节盘生物力学分析,推测TMD可能的发生机理。

1 材料与方法

1.1 一般资料

纳入排除标准:男性,既往体健,营养良好,饮食习惯相近,无特殊炎症史(风湿性、类风湿等),无外伤史,无颌面疼痛、无关节杂响,体检无开口受限、偏斜及颞颌关节疼痛、排除肌源性疼痛及神经性疼痛、无MRI检查禁忌证。

经过伦理委员会批准,受试的志愿者选择为无典型TMD临床症状、并符合以下选择标准的研究对象2例;志愿者1为48岁,志愿者2为20岁。2例无症状志愿者双侧TMJ共计4个TMJ进行MRI检查,并对右侧关节盘及下颌骨髁突进行三维动态重建。

1.2 检查方法

1.2.1 检查设备 采用美国GE Signa 1.5T Twin-Speed 超导MRI扫描仪,成像线圈为3英寸DUAL双表面线圈,扫描范围包括双侧TMJ及周围肌肉组织。

1.2.2 MRI扫描体位及扫描方法 受检者取仰卧位,使用DUAL双表面线圈。模拟张口器具选用美国GE公司张口器,张口器型号MEDRA TMJ-200 S/N 10334(见图1)。受检者先行闭口位双侧TMJ的常规静态斜冠状位、斜矢状位扫描。闭口位MRI影像资料采集完毕后,在医师指导下帮助志愿者对张口器进行操作,将张口装置位移幅度调整至每运动一次为2 mm,嘱志愿者按压控制装置1次,张口器即位移2 mm,即为张口2 mm幅度,对志愿者进行右侧TMJ斜矢状位MRI扫描,记录下图像后再嘱患者按压控制装置一次,重复上述操作,共计张口9次,总位移为18 mm。在检查过程中,患者头部置于头架中以保证受检者头位的固定。

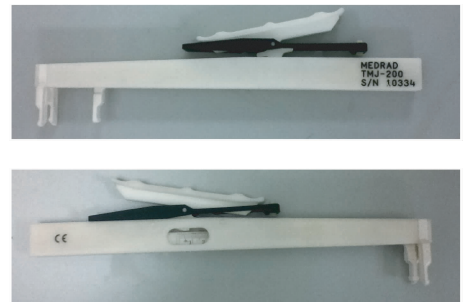


图1 张口器视图

Fig.1 Schematic of the gag

1.2.3 脉冲序列及扫描参数 闭口斜矢状位及斜冠状位采用PDWI序列(TR/TE:1825.0/20.5;FOV:10 cm × 10 cm,带宽:15.63 kHz;层厚/层间距:2.0 mm/1.0 mm;矩阵:320 × 192;扫描时间为121 s);张口位时行斜矢状位T2WI序列扫描(TR/TE:3760.0/85.0;FOV:10 cm × 10 cm/Z;带宽:15.63 kHz;层厚/层间距:2.0 mm/1.0 mm;矩阵:320 × 192;扫描时间:129 s)。斜矢状位扫描方向与髁突长轴成10°~15°,确保能最大限度的获得关节盘的图像。

1.3 TMJ 三维重建方法

使用 Mimics v8.11 软件进行三维重建,将斜矢状断层扫描所获得的 DICOM 数据导入,即可观察原始斜矢状位图像、重建冠状位图像及横断位图像。经观察重建冠状位图像后确定三维重建的起始图像,利用 Mimics 中的阈值技术,选定关节髁突信号范围 600 ~ 1 700 单位,关节盘的信号范围 0 ~ 300 单位^[7]。选择更适合医学图像处理的轮廓内插算法^[8-9],然后设置断层图像的起始位置和终点位置,分别为 -42.442 2 和 -18.448 5 mm。设置平滑因子的数值时,考虑到颞颌关节的空间特征,该数值在 0.4 ~ 0.6 能够良好表现实际的空间形态。将不同张口位的三维图像进行归类:①同一张口位各个角度的图像,包括:俯视图、右侧位图、左侧位图、正面图、背面图、仰视图。②同一角度各个张口位的图像,包括:闭口位,张口为 2、4、6、8、10、12、14、16、18 mm。

1.4 数据测定与分析

将关节盘由前到后分成前、中、后 3 带,并由内到外分为内、中、外 3 份,共计前带内份、前带中份、

前带外份、中带内份、中带中份、中带外份、后带内份、后带中份及后带外份 9 份,并测得在相同空间内,相同的 9 份在不同开口角度下关节盘在各个冠状位坐标下纵向厚度,并进行测量:①同一时间内不同区域的单侧关节盘纵向厚度,②同一区域不同时间的单侧关节盘纵向厚度,③在张口运动中单侧关节盘形变最大的部位。

1.5 统计学方法

采用 SPSS 11.0 统计分析软件,采用 One-Way ANOVA 方差分析。检验 P 值均为 0.05。采用 2007 中文专业版本 Excel 软件,利用曲线拟合方法,研究张口位置(X)与关节盘横径(Y)的关系,在类型项上选择线性(L)。

2 结果

2.1 TMJ 动态三维模型的建立

通过上述三维重建方法利用 DICOM 文件成功创建出颞下颌关节盘在张口运动过程中的三维动态模型。比较于平面的二维静态 MRI 图像,清晰显示了三维动态盘髁关系(见图 2)。



(a) 志愿者 1 (b) 志愿者 2
(1-俯视图,2-右侧位图,3-左侧位图,4-正面图,5-背面图,6-仰视图)

图 2 志愿者颞颌关节闭口位时的 3D 成像

Fig. 2 The 3D imaging of volunteers with TMJ closed (a) Volunteer 1, (b) Volunteer 2

图 2 为两例无症状志愿者闭口位的颞颌关节三维重建图像,包括颞颌关节盘及部分下颌骨,随后请口腔放射科两位主任医师进行双盲形态评价。无症

状志愿者 1 的颞颌关节盘表面形态呈横椭圆形,其上表面呈前凹后凸形,侧面观关节盘呈“S”形。无症状志愿者 2 颞颌关节盘表面形态呈横椭圆形,其

上表面呈前平后凹形,侧面观关节盘呈“V”形。从俯视图来看,闭口位时关节盘能够完全包绕髁突,随着张口幅度的加大,关节盘仍维持椭圆形形状,颞下

颌关节盘对于髁突的包绕程度与张口幅度呈反比(见图3)。



(1-6 分别代表闭口位,张口 2、4、6、8、10 mm 时关节盘形态)

图3 志愿者2 在各个张口位关节盘形态变化示意图

Fig. 3 Morphological changes of the disc at various mouth opening positions in volunteer 2

2.2 张口运动中关节盘变化数据

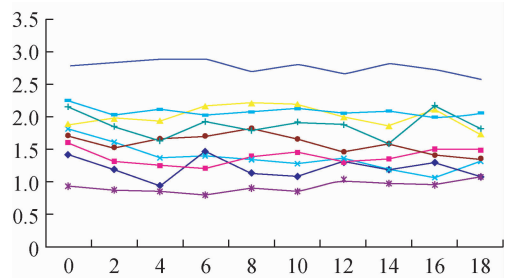
测量不同开口位置下关节盘在各个冠状位坐标下纵向厚度,数据展示出单侧关节盘在各个张口位的动态变化(见图4)。

关节盘各个部分在所有张口位的平均厚度见表1,经比较显示:(1)前带外份及中份统计学无差异,均小于前带内份;中带外份及内份统计学无差异,均大于中带中份;后带:中份 > 内份 > 外份。颞下颌关节盘纵径厚度在张口活动中后带外份及中带内份的变化幅度最大。(2)前带及中带外份无统计学差异,均小于后带外份;中份:后带 > 前带 > 中带,前带及后带中份无统计学差异,均大于中带中份;内份:后带 > 前带 > 中带。前带及后带内份无统计学差异,均大于中带内份。

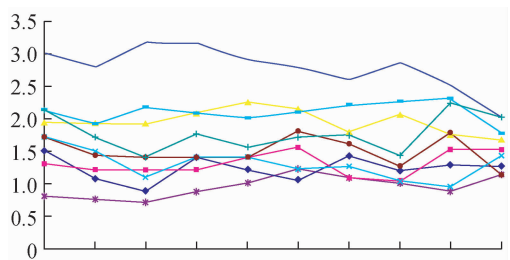
表1 两名志愿者的关节盘不同部位在各张口位的平均厚度($n=20$)

Tab.1 Average thickness of disc in different sections at different mouth opening positions of two volunteers

关节盘部位	外份/mm	中份/mm	内份/mm
前带	1.23 ± 0.43	1.31 ± 0.26	1.96 ± 0.31
中带	1.31 ± 0.41	0.96 ± 0.24	1.50 ± 0.36
后带	1.77 ± 0.39	2.78 ± 0.21	2.08 ± 0.30



(a) 志愿者1



(b) 志愿者2

(横轴代表不同开口位置,纵轴代表关节盘纵径厚度;深蓝:前带外份;粉色:前带中份;黄色:前带后份;蓝绿:中带外份;紫色:中带中份;棕色:中带内份;深绿:后带外份;蓝色:后带中份;绿色:后带内份,单位:mm)

图4 志愿者关节盘各个部分在不同张口位的变化

Fig. 4 Change of disc in different sections at different mouth opening positions (a) Volunteer 1, (b) Volunteer 2

经后处理从三维重建模型上测量在各个张口位中 2 名无症状志愿者关节盘横径变化的数据(见图 5)。利用曲线拟合方法,研究张口位置(x)与关节盘横径(y)的关系,志愿者 1 曲线方程为: $y = -0.03x + 14.44$ 及决定系数 $R^2 = 0.591$, 志愿者 2 曲线方程为: $y = -0.061x + 13.48$ 及决定系数 $R^2 = 0.306$;散点图表明 2 名志愿者张口位置与关节盘横径变化具有直线趋势,颞下颌关节盘的横径随着张口幅度的加大而呈现减小的趋势(见图 6)。

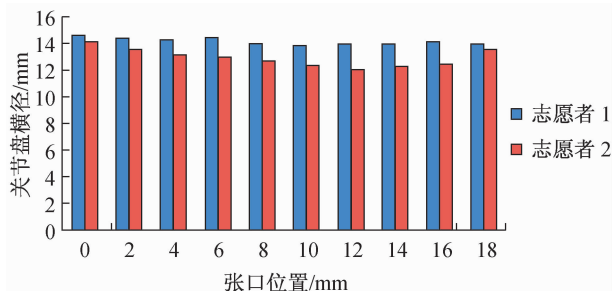


图 5 不同张口位 2 名志愿者关节盘横径变化
 Fig. 5 Transverse diameter change of disc in different open mouth positions of two volunteers

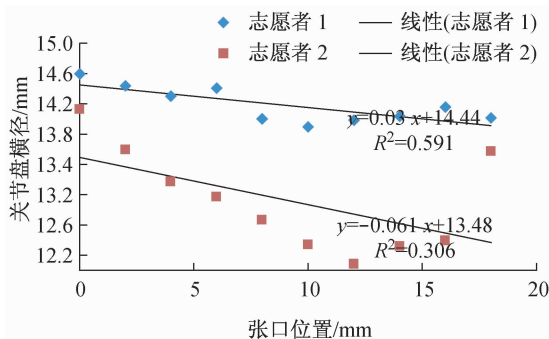


图 6 两名志愿者的张口位置与关节盘横径的线性拟合
 Fig. 6 Linear fitting of the mouth opening positions and articular disc transverse diameter in two volunteers

3 讨论

3.1 颞下颌关节三维重建研究

有限元分析法于 1973 年首次应用到口腔修复学领域,现已广泛应用于 TMJ 的生物力学研究。与传统的实验力学分析相比,利用有限元分析 TMJ 的生物力学具有更多的优点,包括可迅速有效地建立 TMJ 的数学三维模型,模拟 TMJ 的各种受力情况对

各部位进行受力分析,其目的在于为临床诊断和治疗提供依据。Price 等^[5]通过建立 TMJ 模型分析 MRI 进行 TMJ 重建的精确性,认为在 MRI 重建 TMJ 关节盘的过程中可能产生 0% ~ 8% 的误差,这些误差产生的最重要原因是 MRI 扫描的层厚过厚。本研究设定 MRI 扫描层厚为 2 mm,同时在软件处理的过程中选择轮廓内插算法^[8-9],能够比较真实地代表物体,所设计的模型几何形态逼真,可获得较高精度的 TMJ 三维图像。

近年来国内外有几篇关于 TMJ 三维成像的技术研究报道^[10-14]。Chirani 等^[10]利用 Amira 软件针对 1 名男性无症状志愿者的 MRI 影像资料构建了闭口位、半张口位及全张口位的 TMJ 三维模型。Costa 等^[11]证明 TMJ 三维成像对于关节盘移位的诊断具有更高的灵敏性和特异性。Tanaka 等^[12]采集颅骨及硅胶关节盘模型的 MRI 图像,进行三维重建后与实体模型进行对比,认为 MRI 创建的 TMJ 三维模型对于 TMJ 三维有限元分析具有足够的精准性。本研究通过使用张口器对正常生理的张口运动进行动态模拟,完整采集两名志愿者在每个张口位上的所有右侧 TMJ 的斜矢状位资料,成功创建了活体 TMJ 在张口运动中的 MRI 三维动态图像。并且与之前的研究相比,本研究具有诸多优势:①通过运用张口器建立的三维图形更加全面,最接近模拟生理性的张口运动。②通过本研究所制作出的模型,可以动态评判盘髁关系、关节盘形态或髁突位移,对于揭示 TMJ 在张口运动中动态变化规律有很大的帮助。

3.2 TMJ 三维动态模型中关节盘的形态动态变化研究及生物力学初步分析

多数研究者^[15-17]认为,在张口运动中,关节盘随着下颌骨髁突一起运动,并受到关节窝的挤压,关节盘起着缓冲压力的作用。Hayakawa 等^[18]认为,通过高分辨率 MRI 三维可视化模型能直观再现不同功能位时的 TMJ 骨性及相关软组织的空间形态、位置关系及形态变化,可以指导分析 TMJ 的运动机制、TMJ 病变的形态学原因。本研究通过合理运用张口器,模拟了颞颌关节的生理运动表现,利用高分辨率 MR 成像及 Mimics 软件成功建立 TMJ 的有限元三维模型,并对不同张口位的关节盘进行三维有限元分析。通过本研所得模型进行观察后发现,

闭口位时俯视颞颌关节能观察到关节盘完全包绕关节髁突,随着张口幅度的加大,关节盘随着髁突渐渐向后运动,并且使髁突的前面及两侧部分暴露,推断在张口过程中关节盘前带及内外份可能受到被动压力,关节盘被动向后推移,且关节盘的前带及内外份受到了一定的挤压;从三维模型上可以证实,关节盘随着张口运动的进行发生了一定的形态变化。本研究利用 Mimics 软件的工具对于重建的三维关节盘模型横径的测量证明,可以直观显示随着张口幅度的增大,关节盘横径数值在慢慢减小。本研究推测,在张口运动中关节盘可能通过自身形态改变来缓冲周围的压力,并且保护关节髁突及关节窝,这为 TMD 及关节盘穿孔可能发生机制的研究提供了新的思路。本研究从三维模型的动态表现观察了关节盘的形态改变,并为证明以上推测的可能性及关节盘受力最大的部位,进一步对关节盘的三维模型进行有限元分析,在各个张口位上取得不同有限元的纵向厚度。王美青等^[19]通过尸体解剖研究证实,尸体 TMJ 关节盘前、中、后 3 带逐渐过渡,无明显分界。本研究通过分析三维有限元模型发现关节盘在开口运动中各份各带纵径厚度均有变化,并与相关尸体解剖资料相比较^[19],推测在张口运动中无症状志愿者的最大关节盘形态变化在后带外份及中带内份。根据 Osborn^[20]的理论,关节盘形态与其所承受上的压力密切相关,在关节动态运动中,关节盘后带外份及中带内份承受较大的压力,并由此推测这可能是造成关节盘外份易发生穿孔的原因之一。

常规的 MRI 仅能够评价在张口位及闭口位盘髁关系,而对于关节盘的形变以及关节盘受力不能做出很好的评价。本研究通过三维动态模型的建立,动态模拟出了关节盘对于下颌骨髁突的包绕关系,从三维动态图像上不仅可以方便地对于关节盘与髁突位置变化进行观察,显示张口过程中关节盘的形态变化;通过分析关节盘纵向厚度变化了解在运动过程中的关节盘受力情况,可作为在一些常规 MRI 盘髁关系显示阴性的 TMD 患者的补充检查,帮助医师更好评价关节盘的动态改变,了解在其动态过程中的变化规律,分析 TMJ 的运动机制;通过分析关节盘的受力部位分析潜在的或已发生而未显示的关节盘穿孔可能部位,尝试研究 TMD 发病的形态学原因,以

期达到指导临床预防、诊断及治疗的目的。

参考文献:

- [1] Hffomann RG, Kotchen JM, Kotchen TA, *et al.* Temporomandibular disorders and associated clinical comorbidities [J]. *Clin J Pain*, 2011, 27(3): 268-274.
- [2] Zhang ZK, Ma XC, Gao S, *et al.* Studies on contributing factors in temporomandibular disorders [J]. *Chin J Dent Res*, 1999, 2(3-4): 7-20.
- [3] Goto TK, To kumori K, Nakamura Y, *et al.* Volume changes in human masticatory muscles between jaw closing and opening [J]. *Chin J Dent Res*, 2002, 81(6): 428-432.
- [4] 范新东, 邱蔚六. 颞颌关节的磁共振成像 [J]. *上海生物医学工程*, 1998, 19: 49-50.
- [5] 王海鹏, 王友, 容可, 等. 三维有限元法分析膝关节内侧副韧带的生物力学功能 [J]. *医用生物力学*, 2012, 27(1): 40-45.
- Wang HP, Wang Y, Rong K, *et al.* Three-dimensional finite element analysis on biomechanical functions of medial collateral ligament in knee joint [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(1): 40-45.
- [6] 顾晓民, 贾连顺, 陈雄生, 等. 腰椎椎弓峡部裂三维有限元模型的建立与验证 [J]. *医用生物力学*, 2010, 25(1): 45-50.
- Gu XM, Jia LS, Chen XS, *et al.* Biomechanics of lumbar spondylolysis: Finite element modeling and validation [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(1): 45-50.
- [7] Cascone P, Rinaldi F, Pagnoni M, *et al.* Three-dimensional temporomandibular joint modeling and animation [J]. *J Craniofac Surg*, 2008, 19(6): 1526-1531.
- [8] Stelnicki EJ, Stucki-McCormick SU, Rowe N, *et al.* Remodeling of the temporomandibular joint following mandibular distraction osteogenesis in the transverse dimension [J]. *Plast Reconstr Surg*, 2001, 107(3): 647-658.
- [9] 徐亮, 范芦芳, 周家镇, 等. 对 MimicsV10 10 软件的三维实体重建方法的研究 [J]. *中国现代药物应用*, 2008, 2(12): 32-34.
- [10] Chirani RA, Jacq JJ, Meriot P, *et al.* Temporomandibular joint: A methodology of magnetic resonance imaging 3-D reconstruction [J]. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 2004, 97(6): 756-761.
- [11] Costa AL, Yasuda CL, Appenzeller S. Comparison of conventional MRI and 3D reconstruction model for evaluation of temporomandibular joint [J]. *Surg Radiol Anat*, 2008, 30(8): 663-667.