

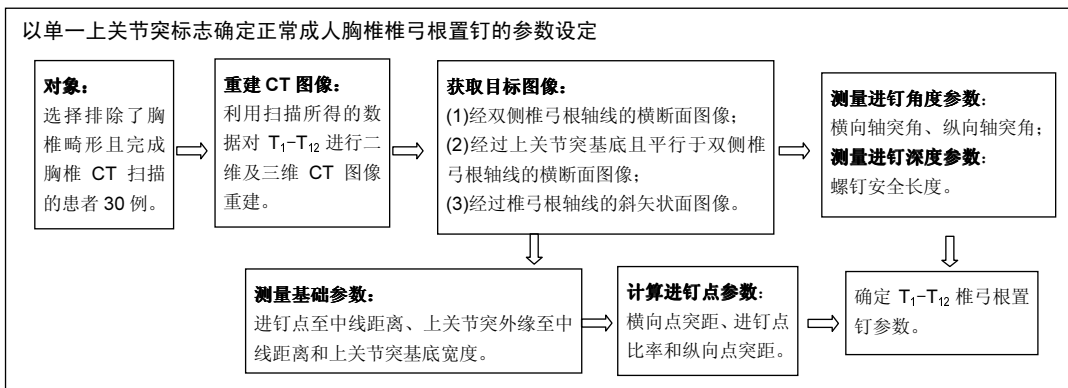
以上关节突确定正常成人胸椎椎弓根置钉参数的影像学测量

卢政好¹, 李吉鹏², 周菁华³, 王卫国⁴ (南华大学附属南华医院, ¹脊柱外科, ³放射科, 湖南省衡阳市 421002; ²金昌市人民医院骨科, 甘肃省金昌市 737100; ⁴中南大学湘雅三医院骨科, 湖南省长沙市 410013)

引用本文: 卢政好, 李吉鹏, 周菁华, 王卫国. 以上关节突确定正常成人胸椎椎弓根置钉参数的影像学测量[J]. 中国组织工程研究, 2017, 21(35):5622-5629.

DOI:10.3969/j.issn.2095-4344.2017.35.008 ORCID: 0000-0001-9245-5587(卢政好)

文章快速阅读:



卢政好, 男, 1975 年生, 辽宁省大石桥市人, 汉族, 2000 年中南大学湘雅医学院毕业, 硕士, 副主任医师, 主要从事脊柱外科方面的研究。

通讯作者: 王卫国, 博士, 主治医师, 中南大学湘雅三医院骨科, 湖南省长沙市 410013

中图分类号:R318

文献标识码:A

文章编号:2095-4344

(2017)35-05622-08

稿件接受: 2017-08-07

文题释义:

椎弓根置钉参数: 即椎弓根置钉内固定技术的三要素, 包括进钉点、进钉角度和进钉深度。进钉点是指施行该技术时选择的螺钉进入点, 理论上应与椎弓根轴线在脊柱后柱表面的投影点重合。进钉角度是指螺钉的前进方向, 理论上螺钉轴心线应与椎弓根轴线重合。进钉深度是指选择的螺钉的长度, 安全的螺钉长度应使螺纹全长位于骨质内。选择正确的进钉点是成功施行该技术的前提, 因为它决定了进钉角度和进钉深度。在颈胸椎, 由于其椎弓根横径比较细小, 进钉点和进钉角度的精确确定是成功施行该技术的关键, 因为它决定了螺钉能否沿椎弓根轴线置入。

上关节突: 是椎弓根与椎板结合处伸向上方的骨性突起, 与上位椎骨下关节突构成关节突关节。胸椎上关节突关节面较为平直, 略向后上外方, 基本呈冠状位。以上关节突为单一标志或联合标志确定椎弓根进钉点, 已见较多文献报道。明确椎弓根进钉角度和上关节突关节面之间的角度关系, 可为胸椎椎弓根置钉内固定技术提供一种安全、简便的确定进钉角度的方法。

摘要

背景: 现有的胸椎椎弓根置钉内固定技术均以上关节突或联合横突为参考标志确定进钉点, 以假想的横断面和矢状面为参考标志确定进钉角度, 诸位学者描述不一。由于患者术中体位的影响和术者主观判断的偏差, 易出现螺钉误置, 产生严重并发症, 限制了该技术的临床应用和推广。目前, 临床上选择一个单一的不受患者体位影响且容易判断的骨性标志作为胸椎椎弓根置钉进钉点和进钉角度的参考, 显得尤为重要。

目的: 通过三维重建 CT 图像的测量探讨正常成人胸椎以上关节突作为单一解剖标志确定椎弓根置钉参数的可行性及其具体的对应关系。

方法: 选取 30 例正常成人胸椎 CT 图像进行三维重建, 在重建后的 T₁-T₁₂ 特定 CT 图像上直接测量以下参数: ①基础参数: 包括进钉点至中线距离、上关节突外缘至中线距离和上关节突基底宽度。通过基础参数间接计算进钉点参数, 包括横向点突距、进钉点比率和纵向点突距, 即进钉点至上关节突外缘的水平距离及其与上关节突基底宽度的比率和进钉点至上关节突基底的垂直距离; ②进钉角度参数: 横向轴突角和纵向轴突角, 即横断面和矢状面上椎弓根轴线与上关节突关节面的夹角; ③进钉深度参数: 螺钉安全长度, 即椎弓根轴线上进钉点至椎体前缘骨皮质的距离。统计每组参数的平均值和标准差, 并比较各节段统计数据的差异。

结果与结论: ①利用三维重建 CT 技术, 可以成功获取 T₁-T₁₂ 经双侧椎弓根轴线横断面、经上关节突基底且平行于双侧椎弓根轴线的横断面和经单侧椎弓根轴线斜矢状面的图像; ②基础参数: T₁-T₁₂ 左右两侧进钉点至中线距离分别为(14.6±2.6) mm 和(14.5±2.5) mm, 上关节突外缘至中线距离分别为(15.7±1.9) mm 和(15.7±2.0) mm, 上关节突基底宽度分别为(8.8±1.3) mm 和(8.8±1.1) mm。每一参数左右两侧测量值差异无显著性意义(P=0.343, 0.214, 0.467); ③置钉参数: T₁-T₁₂ 左右两侧横向点突距分别为(1.2±1.3) mm 和(1.3±1.4) mm, 进钉点比率分别为(14.3±17.0) %和(13.6±16.1) %, 纵向点突距分别为(3.4±0.8) mm 和(3.3±0.9) mm, 横向轴突角分别为(92.4±4.7)°和(92.6±5.0)°, 纵向轴突角分别为(91.8±4.1)°和(91.7±3.6)°, 螺钉安全长度分别为(40.7±4.8) mm 和(40.4±4.6) mm。以上每一参数左右两侧测量值差异无显著性意义(P=0.073, 0.084, 0.310, 0.265, 0.241, 0.175); ④以上结果提示, 正常成人胸椎以上关节突作为单一解剖标志确定椎弓根置钉参数简单可行, 前者与后两者存在特定的对应关系, 可作为一种新的临床上选择置钉参数的方法。

Lu Zheng-hao, Master, Associate chief physician, Department of Spinal Surgery, Nanhua Hospital Affiliated to South China University, Hengyang 421002, Hunan Province, China

Corresponding author: Wang Wei-guo, M.D., Attending physician, Department of Orthopedics, the Third Xiangya Hospital, Central South University, Changsha 410013, Hunan Province, China

关键词:

骨科植入物; 脊柱植入物; 胸椎; 椎弓根螺钉; 内固定; 进钉点; 三维重建; CT; 测量; 上关节突; 置钉准确性

主题词:

胸椎; 骨钉; 内固定器; 组织工程

基金资助:

衡阳市科学技术发展计划(2016KJ45)

Determination of thoracic pedicle screw parameters by superior facet in normal adults: an imaging study

Lu Zheng-hao¹, Li Ji-peng², Zhou Jing-hua³, Wang Wei-guo⁴ (¹Department of Spinal Surgery, ³Department of Radiology, Nanhua Hospital Affiliated to South China University, Hengyang 421002, Hunan Province, China; ²Department of Orthopedics, Jinchang People's Hospital, Jinchang 737100, Gansu Province, China; ⁴Department of Orthopedics, the Third Xiangya Hospital, Central South University, Changsha 410013, Hunan Province, China)

Abstract

BACKGROUND: In the existing thoracic pedicle screw fixation technique, superior facet or combined with transverse process and the imaginary transverse and sagittal section are used as the reference mark of pedicle screw entry point and angle, respectively, which still remain controversial. Because of the effect of position deviation and subjective judgment during surgery, screw misplacement and severe complications often occur, which limit the clinical application and promotion of the technique. At present, it is very important to select a single bony mark, which is not affected by the patient's position, and is easy to judge, as the reference mark of screw entry point and angle.

OBJECTIVE: To explore the feasibility of taking superior facet as a single bony mark to determine thoracic pedicle screw parameters in normal adults by measuring 3D reconstruction CT image and its corresponding relationships.

METHODS: 3D reconstruction CT images of the thoracic spine in 30 normal adults were selected and the basic parameters, entry angle parameters and entry depth parameters were directly determined on specific reconstructed CT images of T₁-T₁₂. The basic parameters included the vertical distance from the entry point to the midline, the vertical distance from the outer edge of superior facet to the midline and superior facet base width. Entry point parameters were indirectly calculated by the basic parameters, including transversal point-facet distance, entry point ratio and sagittal point-facet distance, which was the horizontal distance from entry point to outer edge of superior facet, the ratio of transversal point-facet distance to superior facet base width, and the longitudinal distance from entry point to the base of superior facet. Entry angle parameters included transversal axis-facet angle and sagittal axis-facet angle, which is the transversal and sagittal angle between the axis of pedicle and the surface of facet. Entry depth parameter included safety screw length, which is the distance from entry point to anterior vertebral cortex along the axis of pedicle. Mean and standard deviation were counted and statistics difference was compared.

RESULTS AND CONCLUSION: (1) Using CT technology of 3D reconstruction, T₁-T₁₂ thoracic transversal section through bilateral pedicle axis, transversal section through the base of the superior facet, which parallel to the bilateral pedicle axis, and oblique sagittal section through homolateral pedicle axis were successfully obtained. (2) The statistical results of the basic parameters were as follows: the left and right vertical distances between T₁-T₁₂ from the entry point to the midline were (14.6±2.6) and (14.5±2.5) mm, the vertical distance from the outer edge of superior facet to the midline were (15.7±1.9) and (15.7±2.0) mm, and superior facet base width were (8.8±1.3) mm and (8.8±1.1) mm, respectively. There was no significant difference in the measured values between two sides of the above parameters ($P=0.343, 0.214, 0.467$). (3) The statistical results of pedicle screw parameters were as follows: the left and right transversal point-facet distance between T₁-T₁₂ were (1.2±1.3) and (1.3±1.4) mm, entry point ratio were (14.3±17.0)% and (13.6±16.1)%, sagittal point-facet distance were (3.4±0.8) and (3.3±0.9) mm, transversal axis-facet angle were (92.4±4.7)° and (92.6±5.0)°, sagittal axis-facet angle were (91.8±4.1)° and (91.7±3.6)°, and safe screw length were (40.7±4.8) and (40.4±4.6) mm, respectively. There was no significant difference in the measured values between two sides of the above parameters ($P=0.073, 0.084, 0.310, 0.265, 0.241, 0.175$). (4) These results indicate that taking thoracic superior facet as a single anatomic landmark to determine pedicle screw parameters is simple and feasible in normal adults, and they correlate with each other, which can be used as a new method for choosing screw parameters.

Subject headings: Thoracic Vertebrae; Bone Nails; Internal Fixators; Tissue Engineering

Funding: the Science and Technology Development Program of Hengyang, No. 2016KJ45

Cite this article: Lu ZH, Li JP, Zhou JH, Wang WG. Determination of thoracic pedicle screw parameters by superior facet in normal adults: an imaging study. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2017;21(35):5622-5629.

0 引言 Introduction

胸椎后路内固定技术大体有经椎弓根螺钉固定和椎弓根外螺钉固定两种^[1-2], 现代研究表明, 前者较后者具有更强的螺钉的抗拔出力, 可以满足牢固的三柱固定的要求^[3]。目前, 经胸椎椎弓根置钉内固定技术日益受到临床医生重

视, 已广泛应用于胸椎创伤、炎症、退变、肿瘤及畸形等疾病的治疗, 并取得了较好的临床疗效^[4-6]。但由于胸椎椎弓根横径较为细小和周围毗邻脊髓、胸腔内大血管和心肺等重要结构的解剖特点, 决定了胸椎经椎弓根螺钉固定技术的风险和复杂性, 是椎弓根螺钉内固定技术中难度相对

较大的节段^[7-9]。自从Roy-camille等^[10]最早于1986年报道应用椎弓根螺钉固定治疗胸椎疾病以来, 现在已经有多种胸椎椎弓根置钉方法见诸报道。胸椎椎弓根徒手置钉方法主要有以下几种: Roy-camille法、Louis法、Vaccaro法、Ebraheim法、Kim法、漏斗法和球尖技术等。这些方法均以横突和上位椎的下关节突为参考标志确定进钉点, 同时以假想的横断面和矢状面确定进钉角度, 缺乏统一性和客观标准。由于临床手术置钉时术者主观判断的差异, 加之患者体位的影响, 进钉点和进钉角度的选择常常出现偏差, 导致螺钉误置, 出现严重的并发症, 限制了该技术的临床推广和应用^[11-13]。

在临床应用中, 经椎弓根置钉内固定技术包括确定安全的进钉点、进钉角度和进钉深度3个要素。选择正确的进钉点是成功实行该技术的前提, 因为它决定了进钉角度和进钉深度。通过术前影像学测量和术中探测, 进钉深度的确定相对较为容易。但对于胸椎而言, 进钉点和进钉角度的确定相对困难, 是能否成功实施该技术的关键。理论上, 理想的胸椎椎弓根进钉点应与椎弓根轴线在后柱的投影点重合, 理想的进钉角度应使螺钉轴心线与椎弓根轴线一致, 这样螺钉才能有效的利用椎弓根横径和纵径, 沿椎弓根准确的置入螺钉。由于腰骶椎椎弓根横径和纵径相对较大的解剖学特点, 在该节段即使进钉点和进钉角度的选择即使稍有偏差, 经调整也可达到经椎弓根固定, 所以目前腰骶椎的椎弓根置钉内固定技术较为成熟^[14-15]。但是, 因为胸椎椎弓根横径较小和周围毗邻重要结构的特征, 在该节段要求精确确定椎弓根螺钉进钉点和进钉方向, 螺钉才能沿椎弓根轴线置入, 椎弓根螺钉固定技术才能更加安全有效的实行。如前所述, 由于目前的胸椎经椎弓根置钉内固定技术采用不同的解剖标志确定进钉点和进钉角度, 从而存在一定的缺陷, 所以在胸椎上寻找一个恒定的不受患者体位影响的单一骨性结构作为确定进钉点和进钉角度的参考标志, 能提高置钉的准确性和安全性。

文章旨在利用三维重建CT图像获取T₁-T₁₂特定层面的图像, 通过特定参数的测量确定上关节突与椎弓根置钉参数的对应关系, 从而为临床提供一种简便、安全的椎弓根螺钉置入方法。

1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 临床影像重复测量试验。

1.2 时间及地点 于2016年8月至2017年2月在南华大学附属南华医院放射科完成。

1.3 对象 纳入2016年8月至2017年2月在南华大学附属南华医院住院或门急诊就诊的患者30例, 男14例, 女16例; 年龄21-66岁, 平均44.3岁; 最后诊断: 原发肺部病变8例, 胸痛查因13例, 肋骨骨折7例, 无骨折脱位型颈髓损伤2例。

纳入标准: ①年龄> 18岁; ②CT扫描证实胸椎骨性结构发育正常。

排除标准: ①胸椎骨折和/或脱位; ②胸椎炎症或肿瘤所致的骨质破坏; ③胸椎先天性畸形。

1.4 方法

1.4.1 CT扫描方法 采用GE 64排宝石能谱螺旋CT机进行扫描。体位: 头先进, 仰卧位, 头颈部与床面中线重合并垂直床面。扫描范围: C₇-L₁。扫描参数: 螺旋扫描, 每圈0.6 s, 层厚5 mm, 层间距5 mm, 螺距0.984 : 1, 管电压120 kV, 自动管电流, 显示野20 cm。

1.4.2 目标图像获取方法 利用CT扫描后的T₁-T₁₂原始数据重建层厚1.25 mm、层间距0.625 mm轴位图像, 并将该图像传到AW4.6工作站(GE公司)进行二维及三维CT图像重建, 获取横断面、冠状面和矢状面的图像。对重建后的图像做如下处理: ①在经过且平行于双侧椎弓根轴线前后走向的矢状面图像上(图1A)进行重建, 设置条件为层厚1 mm、层距1 mm、层数25及显示野20 cm。在重建后的图像中选取椎弓根直径最大的图像(图1B)和通过上关节突基底的图像(图1C)作为目标图像; ②在经过单侧椎弓根轴线的横断面图像(图1D)上进行重建(设置条件同前), 在重建后的图像中选取椎弓根纵径最大的斜矢状面图像(图1E)作为目标图像。

1.4.3 参数测量及计算方法 在选取的目标图像上进行参数测量(图2, 长度的测量精度为0.1 mm, 角度的测量精度为0.1°)。(1)在椎弓根横径最大的横断面图像(图2A)上测量: ①进钉点至中线距离: 进钉点至椎体中分线的垂直距离; ②螺钉安全长度: 进钉点在椎弓根轴线上至椎体前缘骨皮质的距离。(2)在经过上关节突基底的横断面图像(图2B)上测量: ①上关节突外缘至中线距离: 上关节突外缘至椎体中分线的垂直距离; ②上关节突基底宽度: 每一侧上关节突基底内外缘之间的距离; ③横向轴突角: 椎弓根轴线上与上关节突关节面开口向后内侧的夹角。(3)在椎弓根纵径最大的斜矢状面图像(图2C)上测量纵向轴突角, 即椎弓根轴线上与上关节突关节面开口向后上方的夹角。每组参数均由2名测量者反复测量3次, 取平均值。通过以上参数的计算获得以下3个参数, 即横向点突距、进钉点比率和纵向点突距。具体计算方法如下: ①横向点突距=上关节突外缘至中线距离-进钉点至中线距离; ②进钉点比率=横向点突距/同侧上关节突基底宽度; ③纵向点突距=(图2A所在层数的数值-图2B所在层数的数值)×层距。其中, 进钉点至中线距离、上关节突外缘至中线距离和上关节突基底宽度为基础参数, 横向点突距、进钉点比率和纵向点突距为进钉点参数, 横向轴突角和纵向轴突角为进钉角度参数, 螺钉安全长度为进钉深度参数。

1.5 主要观察指标

1.5.1 基础参数 进钉点至中线距离、上关节突外缘至中线距离和上关节突基底宽度。

1.5.2 置钉参数 ①进钉点参数: 横向点突距、进钉点比率和纵向点突距; ②进钉角度参数: 横向轴突角和纵向轴

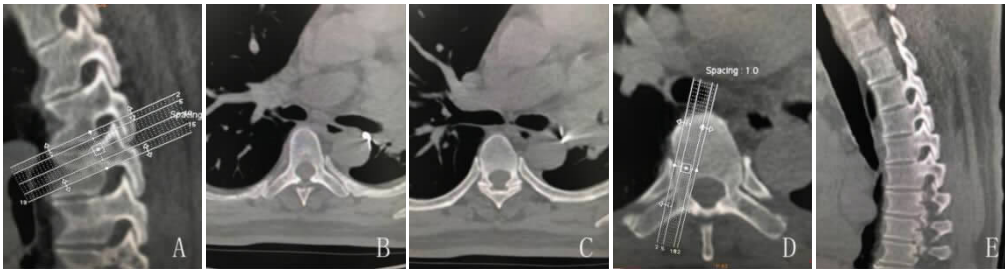


图1 获取用于测量的CT图像的方法
Figure 1 Methods of obtaining CT images for measurement

图注: (以 T₅ 为例)所获得的 CT 图像首先在经过且平行于 T₅ 双侧椎弓根轴线前后走向的矢状面图像上进行重建(图 A), 获取椎弓根横径最大的横断面的图像(图 B)和经过上关节突基底的横断面图像(图 C)。然后在经过单侧(以右侧为例)椎弓根轴线的横断面图像上进行重建(图 D), 获取椎弓根纵径最大斜矢状面的图像(图 E)。

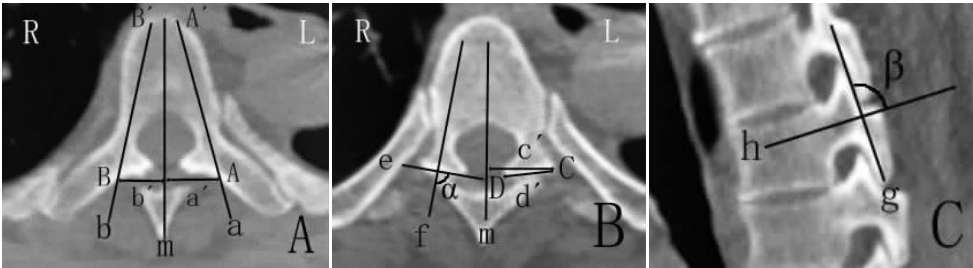


图2 CT 图像上测量参数的示意图
Figure 2 Diagram of parameters measured on the CT image

图注: (以 T₅ 为例)在椎弓根横径最大的横断面图像上先标出椎体中分线 m, 再标出左右两侧椎弓根轴线 a 与 b 及其与后柱表面的交点 A 与 B 和椎体前缘骨皮质的交点 A' 与 B', 测量图中 a' 和 b' 的长度和 AA' 与 BB' 的长度(图 A), 即分别为进钉点至中线距离和螺钉安全长度。在经过上关节突基底且平行于图 A 的图像上先标出椎体中分线 m, (以左侧为例)再标出上关节突外缘 C 和内缘 D, (以右侧为例)最后标出上关节突关节面延长线 e 与椎弓根轴线 f, 测量图中 c' 和 d' 的长度及 α (图 B), 即分别为上关节突外缘至中线距离、上关节突基底宽度和横向轴突角。(以右侧为例)在椎弓根纵径最大的斜矢状面图像上标出上关节突关节面延长线 g 与右侧椎弓根轴线 h, 测量 β (图 C), 即纵向轴突角。

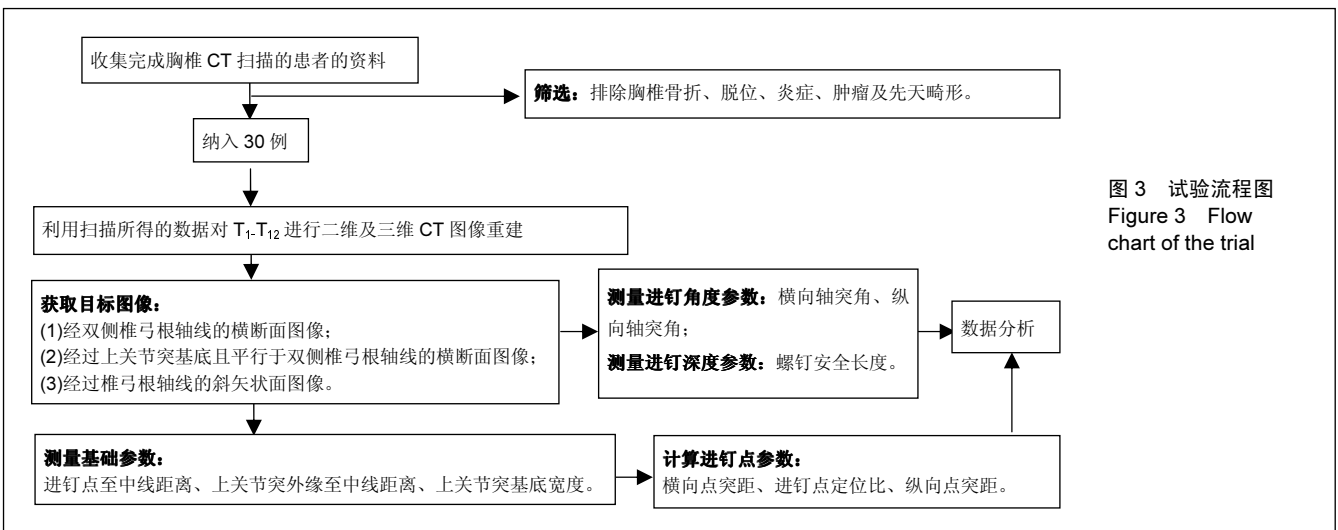


图3 试验流程图
Figure 3 Flow chart of the trial

突角; ③进钉深度参数: 螺钉安全长度。

1.6 统计学分析 采用SPSS 19.0软件对测量数据进行统计学分析, 计算各指标的平均值和标准差。计量资料用 $\bar{x} \pm s$ 表示。相同节段两侧的测量值行配对 *t* 检验。每一指标不同序数椎体间的测量值行单因素方差分析(One-way ANOVA), 并行两两比较(SNK法)。以 $P < 0.05$ 为差异有显著性意义。

2 结果 Results

2.1 参与者数量分析 按意向性处理, 纳入排除了胸椎骨折、脱位、炎症、肿瘤及先天畸形的患者30例, 全部进入结果分析, 无脱落。试验流程图见图3。

2.2 测量者自身的测量误差 进钉点至中线距离的变异系数: 右侧为3.6%, 左侧为2.9%; 上关节突外缘至中线距离的变异系数: 右侧为4.1%, 左侧为3.7%; 上关节突基底宽度的变异系数: 右侧为1.8%, 左侧为2.6%; 横向点突距的变异系数: 右侧为4.9%, 左侧为4.7%; 进钉点比率的变异系数: 右侧为4.4%, 左侧为4.7%; 纵向点突距的变异系数: 右侧为2.3%, 左侧为3.8%; 横向轴突角的变异系数: 右侧为1.6%, 左侧为2.0%; 纵向轴突角的变异系数: 右侧为3.1%, 左侧为2.2%; 螺钉安全长度的变异系数: 右侧为4.1%, 左侧为4.5%。

2.3 测量者间的误差 进钉点至中线距离的变异系数: 右侧为2.7%, 左侧为3.3%; 上关节突外缘至中线距离的变异

表 2 胸椎置钉参数的测量结果

($\bar{x} \pm s$, $n=30$)

Table 2 Metric results of screw parameters in thoracic spine

节段	进钉点参数						进钉角度参数				进钉深度参数	
	横向点突距(mm)		纵向点突距(mm)		进钉点比率(%)		横向轴突角(°)		纵向轴突角(°)		螺钉安全长度(mm)	
	右侧	左侧	右侧	左侧	右侧	左侧	右侧	左侧	右侧	左侧	右侧	左侧
T ₁	-1.6±1.0	-1.6±1.2	4.4±0.5	4.6±0.5	-20.1±13.3	-21.4±15.6	104.2±5.2	103.2±4.4	99.7±3.9	101.2±5.2	34.3±2.3	33.9±2.1
T ₂	1.7±0.8	1.8±0.8	4.4±0.5	4.4±0.5	21.3±10.5	22.7±9.9	97.7±3.5	96.9±4.3	95.5±2.5	95.6±2.3	35.1±2.1	35.3±2.2
T ₃	2.6±1.0	2.7±0.9	4.3±0.4	4.3±0.5	33.0±11.9	34.2±11.7	92.2±2.0	92.7±2.3	91.0±1.9	90.9±1.9	35.8±2.5	36.0±3.2
T ₄	1.4±0.6	1.5±0.7	4.0±0.6	4.0±0.5	18.5±8.5	18.0±8.4	90.3±1.9	90.5±1.8	90.5±1.1	90.4±1.1	38.3±2.4	38.6±2.3
T ₅	1.2±0.6	1.0±0.6	3.7±0.5	3.7±0.6	12.9±7.1	14.6±7.2	90.3±2.1	90.2±1.9	90.1±1.3	90.4±1.0	38.8±2.5	39.3±3.0
T ₆	1.1±0.6	1.2±0.6	3.4±0.6	3.3±0.5	12.9±7.1	14.5±6.8	90.8±2.0	90.7±1.7	90.3±1.2	90.5±1.1	40.0±2.8	41.1±2.9
T ₇	1.9±0.7	2.1±0.9	3.1±0.4	3.0±0.5	23.3±8.6	25.5±11.3	90.6±2.0	90.1±1.9	90.4±1.9	90.5±1.3	41.1±2.4	41.4±3.0
T ₈	1.6±0.6	1.7±0.7	2.9±0.6	3.0±0.5	20.1±8.1	21.3±9.0	90.2±1.6	90.6±2.7	90.4±2.0	90.6±1.7	42.3±2.2	42.5±2.6
T ₉	1.5±0.7	1.6±0.8	2.9±0.5	3.0±0.6	16.0±7.9	17.2±8.6	90.1±1.5	90.3±1.1	90.7±2.0	90.5±2.6	43.3±1.9	43.6±2.5
T ₁₀	2.0±0.6	1.9±0.5	2.8±0.4	2.8±0.4	19.6±5.7	20.1±6.0	90.8±2.4	90.9±1.8	90.9±2.1	90.6±2.3	44.2±2.6	44.3±2.7
T ₁₁	1.3±0.6	1.3±0.6	2.7±0.4	2.7±0.5	13.1±6.1	12.6±5.6	90.4±2.9	90.1±2.4	90.2±3.1	90.0±3.4	45.4±2.5	45.7±3.0
T ₁₂	-0.6±0.7	-0.7±0.8	2.7±0.5	2.7±0.4	-6.0±7.2	-7.2±8.0	93.5±4.5	93.1±5.5	90.5±3.6	90.8±4.2	46.6±2.9	46.9±2.6

表 1 胸椎基础参数的测量结果

($\bar{x} \pm s$, $n=30$)

Table 1 Metric results of basic parameters in thoracic spine

胸椎节段	进钉点至中线距离(mm)		上关节突外缘至中线距离(mm)		上关节突基底宽度(mm)	
	右侧	左侧	右侧	左侧	右侧	左侧
	T ₁	20.5±1.3	20.4±1.2	18.9±1.3	18.8±1.1	7.7±0.4
T ₂	17.1±0.9	16.9±0.9	18.7±1.0	18.8±1.1	8.1±0.5	8.0±0.5
T ₃	14.3±0.8	14.2±0.8	17.0±0.8	16.9±0.8	8.1±0.6	8.0±0.5
T ₄	13.3±1.0	13.4±1.0	14.8±1.0	14.8±0.9	8.3±0.7	8.2±0.7
T ₅	12.6±0.7	12.7±0.8	13.7±0.8	13.9±0.7	8.4±0.5	8.2±0.5
T ₆	12.5±0.9	12.6±0.9	13.7±0.8	13.7±0.6	8.8±0.7	8.2±0.6
T ₇	12.2±0.8	12.1±0.9	14.1±1.0	14.2±0.8	8.4±0.9	8.4±0.7
T ₈	12.4±1.0	12.4±1.1	14.0±0.9	14.1±0.8	8.2±0.8	8.2±0.8
T ₉	13.1±0.8	13.2±0.7	14.6±0.6	14.5±0.6	9.2±1.0	9.2±0.8
T ₁₀	14.2±0.8	14.1±1.0	16.1±0.8	16.2±0.7	10.0±0.7	10.1±0.7
T ₁₁	15.0±1.1	15.1±1.2	16.3±0.9	16.4±0.9	10.2±0.6	10.1±0.6
T ₁₂	17.1±0.6	17.2±0.8	16.5±0.6	16.4±0.9	10.5±0.8	10.3±0.6

系数: 右侧为4.5%, 左侧为4.4%; 上关节突基底宽度的变异系数: 右侧为2.0%, 左侧为1.7%; 横向点突距的变异系数: 右侧为3.9%, 左侧为4.8%; 进钉点比率的变异系数: 右侧为4.5%, 左侧为3.9%; 纵向点突距的变异系数: 右侧为3.4%, 左侧为3.1%; 横向轴突角的变异系数: 右侧为2.2%, 左侧为2.8%; 纵向轴突角的变异系数: 右侧为1.6%, 左侧为2.9%; 螺钉安全长度的变异系数: 右侧为4.4%, 左侧为4.2%。所有变异系数均小于5%, 提示测量者自身和测量者之间的误差较小, 本组测量精确、可靠。以下数据为2名测量者反复测量3次所得的均值, 基础参数的测量结果见表1, 置钉参数的测量结果见表2。

2.4 基础参数

2.4.1 进钉点至中线距离 T₁-T₁₂左右两侧进钉点至中线距离分别为(14.6±2.6) mm和(14.5±2.5) mm, 差异无显著性意义($P=0.343$)。除了T₂与T₁₂、T₃与T₁₀、T₄与T₉、T₅-T₈,

其余节段间的差异均有显著性意义($P < 0.05$)。

2.4.2 上关节突外缘至中线距离 T₁-T₁₂左右两侧上关节突外缘至中线距离分别为(15.7±1.9) mm和(15.7±2.0) mm, 差异无显著性意义($P=0.214$)。除了T₁与T₂、T₄与T₉、T₅-T₈、T₁₀-T₁₂, 其余节段间的差异均有显著性意义($P < 0.05$)。

2.4.3 上关节突基底宽度 T₁-T₁₂左右两侧上关节突基底宽度分别为(8.8±1.3) mm和(8.8±1.1) mm, 差异无显著性意义($P=0.467$)。除了T₂-T₈、T₁₀-T₁₂, 其余节段间的差异均有显著性意义($P < 0.05$)。

2.5 置钉参数

2.5.1 进钉点参数

横向点突距: T₁-T₁₂左右两侧横向点突距分别为(1.2±1.3) mm和(1.3±1.4) mm, 差异无显著性意义($P=0.073$)。在T₁、T₃与T₁₂与其他节段比较, 其余节段间的差异均无显著性意义($P > 0.05$)。

进钉点比率: T₁-T₁₂左右两侧进钉点比率分别为(14.3±17.0)%和(13.6±16.1)% , 差异无显著性意义($P=0.084$)。在T₁、T₃与T₁₂与其他节段比较, 其余节段间的差异均无显著性意义($P > 0.05$)。

纵向点突距: T₁-T₁₂左右两侧纵向点突距分别为(3.4±0.8) mm和(3.3±0.9) mm, 差异无显著性意义($P=0.310$)。除了T₁-T₃、T₇-T₁₂, 其余节段间的差异均有显著性意义($P < 0.05$)。

2.5.2 进钉角度参数

横向轴突角: T₁-T₁₂左右两侧横向轴突角分别为(92.4±4.7)°和(92.6±5.0)°, 差异无显著性意义($P=0.265$)。除了T₃与T₁₂、T₄-T₁₁, 其余节段间的差异均有显著性意义($P < 0.05$)。

纵向轴突角: T₁-T₁₂左右两侧纵向轴突角分别为(91.8±4.1)°和(91.7±3.6)°, 差异无显著性意义($P=0.241$)。除了T₃-T₁₁, 其余节段间的差异均有显著性意义($P < 0.05$)。

2.5.3 进钉深度参数

螺钉安全长度: T_1 - T_{12} 左右两侧螺钉安全长度分别为(40.7±4.8) mm和(40.4±4.6) mm, 差异无显著性意义($P=0.175$)。除了 T_1 - T_3 、 T_4 - T_{10} 每相邻两节段、 T_{11} - T_{12} , 其余节段间的差异均有显著性意义($P < 0.05$)。

3 讨论 Discussion

3.1 胸椎椎弓根螺钉固定技术的现状 近年来, 椎弓根螺钉固定技术已发展成为胸椎后路内固定的主要术式。该技术按照螺钉置入的方法分为徒手置钉技术和辅助置钉技术^[14-15]; 按照螺钉置入的最终效果分为经椎弓根置钉固定技术和椎弓根外置钉固定技术^[1-2]。研究表明, 经椎弓根置钉固定较椎弓根外置钉固定具有更强的三维固定效果^[3-16]。在胸腰段及腰骶椎, 椎弓根螺钉固定技术较为成熟^[17-18]。但在中上胸椎, 由于椎弓根横径较为细小, 易导致螺钉误置。又由于胸椎椎弓根周围毗邻脊髓、大血管、肺组织、胸膜、气管和食管等重要结构的原因, 螺钉误置会产生严重甚至致命的并发症, 限制了该技术的临床应用和推广^[11-19]。中上胸椎经椎弓根置钉固定要求选择准确的进钉点、进钉角度和进钉深度, 螺钉才能沿椎弓根通道安全置入, 所以国内外众多学者对中上胸椎置钉参数进行了广泛且深入的研究。

确定进钉点是实施经椎弓根置钉固定技术的第1步, 是决定该技术能否获得成功的前提。确定进钉角度是实施该技术的第2步, 是决定该技术能否获得成功的关键。确定进钉深度是第3步, 可以通过术前测量和术中探测相对较易明确。目前, 徒手置钉技术进钉点的确定方法主要有Roy-camille法、Louis法、Vaccaro法、Ebraheim法、Kim法等几种。其中, 最早于1986年提出的Roy-camille法将横突中分线和关节突中线的交点确定为进钉点^[10], 是目前临床上经常采用的方法。1992年提出的Louis法以单一下关节突为进钉点参考标志^[20], 并认为不同胸椎节段进钉点的选择也应不同。该法认为水平参考线上进钉点位于上位椎下关节突下方3 mm处; 垂直参考线上进钉点的选择略有不同, T_1 - T_3 位于关节突外缘内侧3 mm处, T_4 - T_{10} 更偏内侧一些。1995年提出的Vaccaro法将横突基底作为进钉点的选择标志^[21], 提出横突基底上缘和关节突中线的交点为进钉点的观点。1997年提出的Ebraheim法以上关节突外缘和横突中线为参考标志^[22], 指出不同性别和不同节段胸椎进钉点的选择存在差异。该法认为 T_1 - T_2 的进钉点位于横突中线上3.0-4.0 mm, 上关节突外缘内7.0-8.0 mm; 而 T_3 - T_{12} 的进钉点在横突中线上5-8 mm, 上关节突外缘内4.0-5.0 mm。2004年Kim等^[23]介绍的徒手椎弓根螺钉置入技术进钉点变异较大, 需要手术者有丰富的经验。这些方法均依靠单独或联合解剖标志确定进钉点, 再以假想的横断面和矢状面确定进钉角度, 统称为旧式徒手置钉技术。该技术明显存在两个缺陷, 一是以假想的明显受患者体位影响的矢状面

为参考标志, 二是可供术者选择的螺钉内倾角度 0° - 30° 不等, 使术者主观判断容易出现偏差, 导致螺钉误置。国内学者报道在正常患者徒手置入胸椎椎弓根钉的椎弓根内侧壁穿透率达10.7%^[24-25]。Modi等^[26]研究发现脊柱侧凸患者中上胸椎的螺钉误置率更是高达36%和33%。由于中上胸椎椎弓根横径较纵径明显细小, 所以决定置钉精确性的关键因素是螺钉横向内倾角。有鉴于此, 近年来学者们提出新式徒手置钉技术, 包括直视法、漏斗法和球尖技术等^[27-30]。这些方法主要是对确定进钉角度的改进, 仍应用Roy-camille法确定大致的进钉点。具体操作时, 先咬除进钉点周围3-5 mm的皮质骨, 再用刮匙刮除进钉点下方部分松质骨, 暴露椎弓根通道管口和四壁(重点暴露内壁), 依靠器械探测预制钉道的完整性, 直视下置钉。鉴于以上徒手置钉技术进钉点和进钉角度确定方法的多样性, 有学者试图采用统一解剖标志确定进钉点和进钉角度, 但螺钉误置率仍高达24.2%^[31-32]。总之, 上述的徒手置钉技术忽视了胸椎的变异性, 加之术中诸多因素对术者主观判断的影响, 进钉点和进钉角度的选择常有一定误差, 发生了较高的螺钉误置率。近年来, 借助于计算机导航的辅助置钉技术能将螺钉的误置率明显降低, 但由于费用昂贵不能在临床上广泛开展^[33-34]。所以, 能否寻找到一个恒定的少有变异且术中不受患者体位影响的解剖结构作为胸椎进钉点和进钉角度的参考, 是临床上安全施行中上胸椎经椎弓根置钉固定的关键点。

3.2 以单一上关节突标志作为胸椎椎弓根置钉参数的可行性及优缺点 胸椎上关节突是椎弓根与椎板结合处向上方的骨性突起, 与上位椎骨下关节突构成关节突关节。胸椎上关节突关节面较为平直, 略向后上外方, 基本呈冠状位。由于胸廓的限制, 胸椎关节突关节仅具有较小的活动度, 胸椎关节突关节的增生主要发生于下关节突背侧, 而上关节突增生极为少见。以上关节突为单一标志或联合横突标志确定椎弓根钉进钉点, 已见较多文献报道^[10, 20-23]。本研究结果显示的胸椎椎弓根轴线与上关节突关节面近乎垂直的角度关系, 可为胸椎椎弓根螺钉进钉角度的选择提供参考, 是本研究的创新之处。所以, 以单一上关节突标志确定胸椎椎弓根置钉参数是可行的。

CT扫描三维重建技术可以满足测量胸椎椎弓根相关参数的需求, 为临床椎弓根钉的置入提供准确的参考数据, 提高椎弓根螺钉置入的安全性和精确性^[35]。因为胸椎双侧上关节突基底并非完全呈水平位, 而是略呈“~”形, 所以本研究所截取的经过上关节突基底的图像实际上是经过上关节突基底外缘的横断面图像, 这很容易做到。故此, 本研究确定的进钉点参数实际上明确的是进钉点与上关节突基底外缘的二维对应关系: ①横向点突距和进钉点比率是确定进钉点在水平参考线上的参数, 两者的综合测量可以精确确定进钉点。本文结果显示, T_1 和 T_{12} 横向点突距和进钉点比率均小于0, 提示在水平参考线上 T_1 和 T_{12} 进钉点

位于上关节突基底外缘外侧; T_2-T_{11} 横向点突距和进钉点比率均大于0, 提示进钉点位于上关节突基底外缘内侧。结合本研究测量数据, T_1 和 T_{12} 水平参考线上进钉点位于上关节突基底外缘2.0 mm范围内。这与前文述及的Ebraheim法明显不同。实际上, T_1 和 T_{12} 的椎弓根横径相对较大, 均大于7 mm, 而临床用于中上胸椎的椎弓根螺钉直径为3.5-4.0 mm, 进钉点可以适当内移, 所以可以统一将上关节突基底外缘至其内侧2.0 mm处作为在水平参考线上胸椎的进钉点。另外, 本文结果同时显示, 除了 T_3 进钉点比率接近1/3, 其他胸椎节段进钉点比率均在1/5左右。此结果提示临床操作时, 绝大部分胸椎不能将上关节突中线或其基底中外1/3处作为水平参考线上的进钉点, 而应适当外移至上关节突基底中外1/5处更为精确。这与前述的各种旧式徒手置钉技术进钉点的选择方法有明显差异; ②纵向点突距是确定进钉点在垂直参考线上的参数, 虽然胸椎椎弓根纵径明显大于横径, 但该参数的选择仍要求精确。因为胸椎椎弓根横断面呈椭圆形, 偏离该参数的上下范围的调整将影响椎弓根横径的最大利用。本研究采用椎弓根轴线和上关节突基底外缘所在的层面差值计算, 较在图像上测量更精确, 可以最大程度的减小测量者自身及测量者之间的误差。结果显示, 在垂直参考线上进钉点位于上关节突基底外缘下方3 mm处。在 T_1-T_3 , 进钉点适当下移(1.0-2.0) mm; 在 T_7-T_{12} , 进钉点适当上移1.0 mm; ③轴突角是确定进钉角度的重要参数, 理想的进钉角度应该选择螺钉与某一解剖标志近乎平行或垂直的关系, 这样术中更容易判断。本研究主要测定横断面上和斜矢状面上椎弓根轴线与上关节突关节面的夹角。本文结果显示, T_1 和 T_2 的横向轴突角和纵向轴突角变异较大, 均明显大于 90° ; T_{12} 的横向轴突角变异更大, 纵向轴突角相对恒定, 均略大于 90° ; 而 T_3-T_{11} 规律明显, 均约为 90° 。临床操作时, 横向轴突角的确定最为关键, 因为大多数螺钉的误置均是由横向轴突角的确定失误造成的。前文已述及, 因为 T_1 、 T_2 和 T_{12} 椎弓根横径较大的原因, 水平参考线上进钉点可以适当内移, 那么随之横向轴突角应相应减小。综上所述, 可以选择 90° 的横向轴突角作为胸椎椎弓根螺钉的进钉角度; ④螺钉安全长度是确定进钉深度的参数。在胸椎, 由于椎体前方存在重要结构, 所以理想的进钉深度应该不超过椎体前缘皮质。本文结果显示, T_1-T_3 螺钉安全长度应选择30 mm为宜, T_4-T_8 可增至35 mm, T_9-T_{12} 可增加至40 mm。

与现有的中上胸椎经椎弓根置钉固定技术相同, 本文所研究的椎弓根置钉方法也必须咬除上位椎部分下关节突达到暴露上关节突的目的来实现置钉参数的确定。由于破坏了下关节突, 增加了手术创伤, 是本方法不可避免的缺点。但在提高置钉的方便性、安全性和精确性方面, 以单一上关节突标志确定置钉参数具有以下优点: ①上关节突是客观存在于胸椎的恒定骨性结构, 不需设定横突中分线等假想标志, 少有增生且术中易于辨认, 能够最大程度避

免术者主观判断对进钉点确定的影响; ②不需以假想的横断面和矢状面为参考标志确定进钉角度, 由于椎弓根轴线与上关节突关节面存在近乎垂直的关系, 术中容易确定, 能够最大程度避免术中患者体位对术者判断进钉角度的影响; ③由于胸椎椎弓根内侧、下方、外侧和前方分别毗邻脊髓、神经根、胸膜、肺组织、气管、食管和大血管等重要结构的原因, 所以术中具体操作时, 应坚持“内外适中、宁上勿下、宁短勿长”的原则。根据此原则及本研究结果, 进钉点可选择在上关节突基底外缘的内侧1.0-2.0 mm与下方3 mm的交点处, 靠近上位胸椎适当下移1.0-2.0 mm; 进钉角度可选择与上关节突关节面垂直的方向, 在 T_1 和 T_2 节段适当增加(5.0-10.0) $^\circ$; 进钉深度在 T_1-T_3 以选择30 mm为宜, T_4-T_8 可增至35 mm, T_9-T_{12} 可增加至40 mm, 但在 $T_{11}-T_{12}$ 应个体化对待, 可适当延长至45 mm。

3.3 本研究的不足和局限性 本研究样本量较小, 所测得的结果尚不能揭示在不同性别和不同年龄人群中, 以上关节突确定椎弓根置钉参数是否存在差异, 这是本研究的不足之处, 有待于进一步完善。另外, 本研究所选取的样本均来源于本地区, 所得结论能否反映国人总体以上关节突确定的椎弓根置钉参数, 这是本研究的局限, 还有待于多中心大样本的进一步研究。另外, 在存在胸椎上关节突增生的老年患者中, 以上关节突确定椎弓根置钉参数能否提高置钉的准确性, 有待于临床验证。

总之, 正常成人胸椎以上关节突作为单一解剖标志确定椎弓根置钉参数简单可行, 本研究结果显示的前者与后两者所存在的对应关系, 可作为一种新的临床上选择置钉参数的方法。

致谢: 对南华大学附属南华医院脊柱外科各位医务人员的配合与支持, 以及放射科各位医师和技师的帮助表示感谢。

作者贡献: 卢政好、王卫国进行试验设计; 周菁华采集图像; 周菁华、卢政好测量数据; 李吉鹏、王卫国分析数据; 卢政好、李吉鹏成文; 王卫国、周菁华审校。

利益冲突: 所有作者共同认可文章无相关利益冲突。

伦理问题: 临床试验研究的实施符合《赫尔辛基宣言》和医院对人体研究的相关伦理要求。文章的撰写与编辑修改后文章遵守了《观察性临床研究报告指南》(STROBE指南)。参与试验的患病个体及其家属为自愿参加, 在充分了解本治疗方案的前提下签署“知情同意书”。

文章查重: 文章出版前已经过 CNKI 反剽窃文献检测系统进行 3 次查重。

文章外审: 文章经国内小同行外审专家双盲外审, 符合本刊发稿宗旨。

作者声明: 第一作者对研究和撰写的论文中出现的不端行为承担责任。论文中涉及的原始图片、数据(包括计算机数据库)记录及样本已按照有关规定保存、分享和销毁, 可接受核查。

文章版权: 文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

开放获取声明: 这是一篇开放获取文章, 文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享3.0”条款, 在合理引用的情况下, 允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展, 同时允许

任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献, 并为之建立索引, 用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

4 参考文献 References

- [1] Kim JH, Choi GM, Chang IB, et al. Pedicular and extrapedicular morphometric analysis in the Korean population: computed tomographic assessment relevance to pedicle and extrapedicular screw fixation in the thoracic spine. *J Korean Neurosurg Soc.* 2009;46(3):181-188.
- [2] 刘建伟, 邹海波, 肖奇, 等. 胸椎椎弓根螺钉与椎弓根外侧螺钉固定治疗胸椎骨折的比较研究[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2010, 25(7):580-582.
- [3] Wang H, Wang HF, Sribastav SS, et al. Comparison of pullout strength of the thoracic pedicle screw between intrapedicular and extrapedicular technique: a meta-analysis and literature review. *Int J Clin Exp Med.* 2015;8(12):22237-22245.
- [4] 程鑫华, 余永桂, 曹洪. 后路复位椎弓根钉棒系统治疗胸椎骨折脱位[J]. *湖北医药学院学报*, 2016, 35(5): 491-494.
- [5] Gonzalvo A, Fitt G, Liew S, et al. Correlation between pedicle size and the rate of pedicle screw misplacement in the treatment of thoracic fractures: Can we predict how difficult the task will be? *Br J Neurosurg.* 2015;29(4):508-512.
- [6] Ikeuchi H, Ikuta K. Accuracy of pedicle screw insertion in the thoracic and lumbar spine: a comparative study between percutaneous screw insertion and conventional open technique. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2016;136(9): 1195-1202.
- [7] Hyun SJ, Kim YJ, Cheh G, et al. Free hand pedicle screw placement in the thoracic spine without any radiographic guidance: technical note, a cadaveric study. *J Korean Neurosurg Soc.* 2012;51(1):66-70.
- [8] 孙志峰, 曹晓建. 胸椎椎弓根螺钉技术的现状及研究进展[J]. *实用骨科杂志*, 2015, 21(5):432-435.
- [9] Elliott MJ, Slakey CJ. Thoracic pedicle screw placement: analysis using anatomical landmarks without image guidance. *J Pediatr Orthop.* 2007;27(5):582-586.
- [10] Roy-camille R, Saillant G, Mazel C. Plating of thoracic, thoracolumbar and lumbar injuries with pedicle screw plates. *Orthop Clin North Am.* 1986;17(1):147-159.
- [11] 杨明坤, 刘川, 张旭, 等. 上胸椎椎弓根螺钉固定并发症的探讨[J]. *实用骨科杂志*, 2014, 20(6):500-503.
- [12] 王志焱, 肖玉周. 上胸椎椎弓根螺钉置入技术的研究进展[J]. *医学综述*, 2012, 18(18):2995-2998.
- [13] Ishii K, Shiono Y, Funao H, et al. A novel Groove-Entry technique for inserting thoracic percutaneous pedicle screws. *Clin Spine Surg.* 2017;30(2):57-64.
- [14] Gang C, Haibo L, Fancai L, et al. Learning curve of thoracic pedicle screw placement using the free-hand technique in scoliosis: how many screws needed for an apprentice? *Eur Spine J.* 2012;21(6):1151-1156.
- [15] Waschke A, Walter J, Duenisch P, et al. CT-navigation versus fluoroscopy-guided placement of pedicle screws at the thoracolumbar spine: single center experience of 4,500 screws. *Eur Spine J.* 2013;22(3): 654-660.
- [16] 盛红枫, 徐卫星, 卢笛, 等. 上中胸椎经椎弓根-肋骨单元途径置钉的安全性及稳定性研究[J]. *中医正骨*, 2017, 29(2):1-5.
- [17] 秦毅, 李勇, 李振宇, 等. 微创后路固定联合前路病灶清除植骨融合治疗胸腰段脊柱结核[J]. *中国矫形外科杂志*, 2014, 22(7): 659-661, 667.
- [18] 卢政好, 欧军, 苏小桃, 等. 微创经皮置钉技术治疗胸腰椎骨折的临床疗效[J]. *临床骨科杂志*, 2016, 19(5): 518-521.
- [19] Kira F, Aimee E, Charles E, et al. Upper thoracic pedicle screw loss of fixation causing spinal cord injury: a review of the literature and multicenter case series. *J Pediatr Orthop.* 2013;33(1):75-79.
- [20] Louis R. Spine internal fixation with Louis instrumentation. In An HS, Cotler JM eds. *Spine Instrumentation.* Baltimore: Williams and Wilkins, 1992:183-196.
- [21] Vaccaro AR, Rizzolo SJ, Balderston RA, et al. Placement of pedicle screws in the thoracic spine. Part II: Anatomical and radio-graphic assessment. *Bone Joint Surg(Am).* 1995;77(8): 1200-1206.
- [22] Ebraheim NA, Xu R, Ahmad M, et al. Projection of the thoracic pedicle and its morphometric analysis. *Spine.* 1997; 22(3):233-238.
- [23] Kim YJ, Lenke LG, Bridwell KH, et al. Free hand pedicle screw placement in the thoracic spine: is it safe? *Spine(Phila Pa 1976).* 2004;29(3):333-342.
- [24] 徐丽明, 顾锐, 朱庆三, 等. 徒手与在计算机导航下中上胸椎椎弓根螺钉置入技术的前瞻性对比研究[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2010, 25(9):778-780.
- [25] 叶斌, 孟祥龙, 刘玉增, 等. 徒手置钉技术在脊柱畸形矫正中的准确性与安全性研究[J]. *脊柱外科杂志*, 2014, 12(1):25-34.
- [26] Modi HN, Suh SW, Fernandez H, et al. Accuracy and safety of pedicle screw placement in neuromuscular scoliosis with free-hand technique. *Eur Spine J.* 2008;17(12):1686-1696.
- [27] 王学文, 李艳超, 郑海龙. 漏斗技术结合徒手椎弓根探针技术在椎弓根置钉术中的应用[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2013, 28(3): 213-215.
- [28] 田大胜, 荆珏华, 钱军, 等. 漏斗技术结合探针技术置入胸椎椎弓根螺钉在脊柱畸形矫正术中的应用[J]. *颈腰痛杂志*, 2014, 35(6): 431-434.
- [29] 刘显宏, 欧云生, 权正学, 等. “漏斗技术”置入胸椎椎弓根螺钉在青少年特发性脊柱侧弯矫正术中的应用[J]. *重庆医科大学学报*, 2012, 36(10):1264-1267.
- [30] 梁春祥, 李浩森, 陈克冰, 等. Balltip技术置入中上胸椎椎弓根螺钉的准确性评价[J]. *中山大学学报(医学科学版)*, 2012, 33(1): 116-120.
- [31] 唐绍峰, 姚女兆, 夏曦, 等. 统一解剖标志徒手胸椎椎弓根置钉技术的初步应用[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2015, 33(5):588-592.
- [32] 潘定康, 罗军, 单永兴. 横突上嵴椎弓根螺钉置入治疗胸椎骨折的疗效[J]. *武警医学*, 2015, 26(11):1141-1144.
- [33] Larson AN, Polly DW Jr, Guidera KJ, et al. The accuracy of navigation and 3D image-guided placement for the placement of pedicle screws in congenital spine deformity. *J Pediatr Orthop.* 2012;32(6):e23-29.
- [34] Allam Y, Silbermann J, Riese F, et al. Computer tomography assessment of pedicle screw placement in thoracic spine: comparison between free hand and a generic 3D-based navigation techniques. *Eur Spine J.* 2013;22(3):648-653.
- [35] 常志强, 张沛, 吴一民, 等. CT多平面三维重建条件下颈椎椎弓根置钉减少偏差的应用价值[J]. *中国组织工程研究*, 2014, 18(48): 7833-7837.