doi:10.11659/jjssx.11E022088

·临床研究·

肱骨近端骨折的地图研究

王 星[1],郭小波[2],李云飞[3],靳江涛[2] (1.长治医学院研究生院,山西 长治 046000;2.晋城大医院脊柱微创科,山西 晋城 048000;3.晋城市人民医院麻醉科,山西 晋城 048000)

[摘 要] **目的** 应用3D技术和骨折地图技术将肱骨近端骨折患者的CT数据立体化,分析肱骨近端骨折线的分布特征,从而提高医师对该类骨折的认识及提供标准化骨折切割模型。**方法** 回顾性分析162例患者肱骨近端骨折线的分布情况。应用Mimics Research 21.0软件将所有数据进行三维重建,建立模型。将提取的三维模型导入到3-matic Research 13.0软件,复位骨折碎片后在E-3D medical 18.08软件中使其与3D模板完全重合,在模板表面绘制光滑曲线。将所有曲线叠加到模板上,生成三维骨折线图和热图。线性回归分析骨折位置与年龄、性别、患肢的左右侧的相关性。**结果** 在生成的肱骨近端骨折热图上,红色区域集中分布于肱骨头基底、大结节基底、小结节基底、肱骨解剖颈。4部分骨折是最常见的类型,共87例(53.7%),单独绘制了4部分骨折的特征性骨折地图。累及大结节的红色条带沿着结节间沟外侧缘纵行向近端走行至大结节最高点,累及小结节的红色条带较宽,在小结节中下部横向延伸至肱骨头内侧基底,肱骨外科颈外侧出现3条红色细小条带向内侧环绕延伸。简单线性回归分析显示,性别和骨折位置显著相关($P<0.001$),而与年龄、患肢的左右侧无相关性($P>0.05$)。多元线性回归分析显示,在加入年龄后,性别与骨折位置的相关性更加显著($P<0.001$)。**结论** 4部分骨折在肱骨近端骨折中最常见,本研究构建了肱骨近端骨折地图,可提高医师对肱骨近端骨折的认识,提供标准化骨折切割模型,指导术前规划及术中操作。

[关键词] 肱骨近端骨折;计算机断层扫描;三维图像;骨折地图;热图;4部分骨折
[中图分类号] R681.7 [文献标识码] A [收稿日期] 2022-11-16

Map study of proximal humerus fractures

WANG Xing[1], GUO Xiao-bo[2], LI Yun-fei[3], JIN Jiang-tao[2] (1.Graduate School, Changzhi Medical College, Changzhi Shanxi 046000, China; 2. Department of Minimally Invasive Spine Orthopedics, Jincheng General Hospital, Jincheng Shanxi 048000, China; 3.Department of Anesthesiology, Jincheng People's Hospital, Jincheng Shanxi 048000, China)

Abstract: Objective The 3D technology and fracture mapping technology were applied to stereoscopic CT data of patients with proximal humerus fractures, and the distribution characteristics of proximal humerus fracture lines were analyzed in order to improve the understanding of these fractures of physicians and provide standardized fracture cutting models. **Methods** The distributions of the proximal humeral fracture lines in 162 patients were retrospectively analyzed. The Mimics Research 21.0 software was applied to the 3D reconstruction of all the data and the establishment of the model. The extracted 3D model was imported into the 3-matic Research 13.0 software, the reduction of fracture fragments was conducted and made it completely overlap with the 3D template in E-3D medical 18.08 software, and the smooth curve was drawn on the template surface. All curves were superimposed on the template to generate a three-dimensional bone fracture line map and a heat map. The linear regression analysis was performed to analyze the correlation between fracture location and age, gender, and right and left sides of the affected limb. **Results** On the generated heat map of proximal humerus fractures, the red areas were concentrated on the base of the humeral head, the base of the greater tuberosity, the base of the lesser tuberosity, and the anatomic neck of the humerus. The 4-part fracture was the most common type, with 87 cases (53.7%), and its characteristic fracture maps were drawn separately. The red bands involving the greater tubercle longitudinally and proximally along the lateral margin of the intertubercular sulcus to the highest point of the greater tubercle, and the red bands involving the lesser tubercle were wider and extend transversely in the lower and middle portion of the lesser tubercle to the medial base of the humeral head, there were three thin red bands on the lateral aspect of the surgical neck of the humerus extending around the inside. The simple linear regression analysis showed that fracture location only had significant correlation with gender ($P<0.001$), while which had no correlation with age or right and left sides of the affected limb ($P>0.05$). Multiple linear regression analysis showed that the correlation between gender and fracture location was more significant with age ($P<0.001$). **Conclusion** The 4-part fracture is the most common in proximal humerus fractures. The proximal humerus fracture map constructed in this study can improve the understanding of proximal humerus fractures of physicians, provide a standardized fracture cutting model, and guide the preoperative planning and intraoperative operations.

Keywords: proximal humerus fracture; computed tomography; three-dimensional images; fracture map; heat map; 4-part fracture

[通信作者] 靳江涛,E-mail:bobo4310@163.com

肱骨近端骨折是上肢第二大常见骨折类型,占所有骨折的4%~5%,这种骨折通常归因于年轻人群的高能量损伤和老年人群的低能量损伤,年龄分布呈双峰特点[1-2]。目前肱骨近端骨折有许多分类系统,其中应用最广泛的是Neer、AO分类。Neer分类将肱骨上端4个组成部分(肱骨头、大结节、小结节、肱骨上端骨干)的相互移位程度分为6个基本类型,移位>1 cm或成角>45°,则认为是移位骨块[3]。这些类型及其子类型可用于描述骨折形态、评估稳定性和预测预后。但随着放射学的发展和进步,考虑到每条骨折线的高度变异性,上述经典分类方法对于了解实际骨折形态的准确信息存在一定的局限性。有学者提出虽然骨折线描述很重要,但不能被分类所取代[4]。骨折地图技术最早在2009年由Armitage等[5]提出,是将多个骨折模型的骨折线通过CT三维重建叠加绘制在一个标准模型上,直观显示骨折形状的方法。3D-CT的骨折测绘技术已被广泛应用于分析股骨近端[6]、胫骨平台[7-8]和髌骨[9]等骨折特征,然而关于肱骨近端骨折的三维模型地图研究尚未见报道。本研究结合骨折地图技术和Neer分型进行特征性骨折地图的绘制,分析肱骨近端骨折的骨折线频率和形态学特征,以便更好地进行骨折分类、术中复位、内固定设计和肱骨近端骨折生物力学标准切割模型建立。

1 资料与方法

1.1 临床资料

选取2015年1月至2020年12月晋城大医院收治的186例肱骨近端骨折成年患者。纳入标准:①年龄>18岁;②有完整的X射线和CT扫描数据;③肱骨闭合性骨折。排除标准:①CT图像扫描层厚>1.5 mm;②开放性或病理性肩关节骨折,发育不良;③异位骨化或肩部手术史。24例因CT图像扫描层厚不符合要求剔除,最终纳入162例患者,其中男67例,女95例;年龄19~90岁,平均(58.10±15.20)岁;左肩损伤75例,右肩损伤87例;肱骨近端2部分骨折9例,3部分骨折66例,4部分骨折87例。本研究获晋城大医院医学伦理委员会审批(2022101001)。

1.2 方法

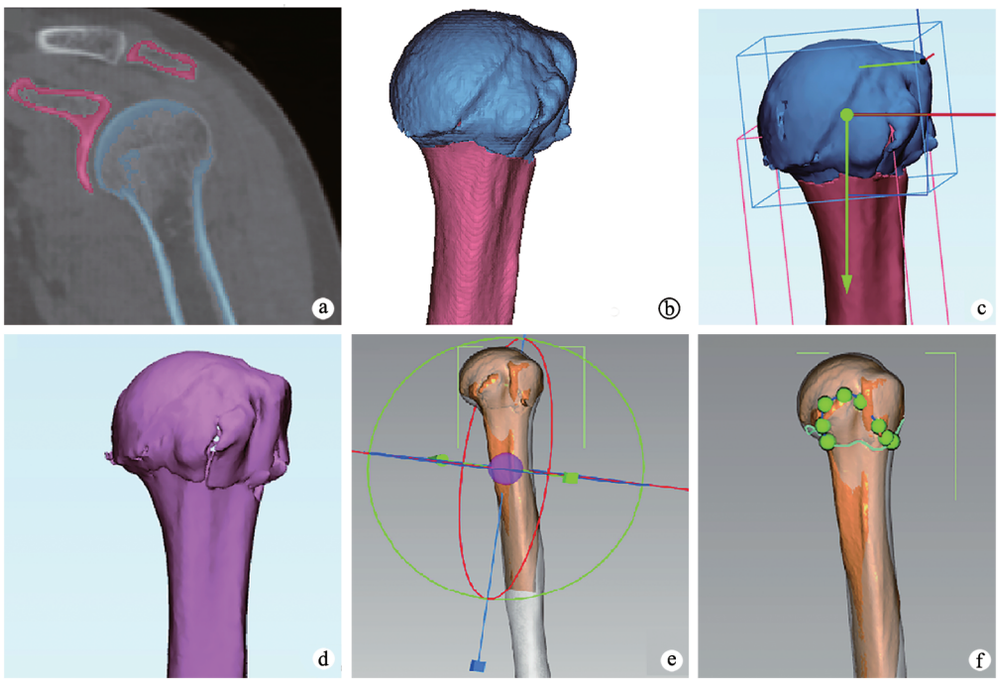
1.2.1 CT数据采集与三维重建 患者均进行西门子64层螺旋CT(120 kV,350 mA,层厚≤1.5 mm)扫描。导出DICOM格式的扫描数据到Mimics Research 21.0软件中(图1a)。先在Mimics软件中选择CT图像的矢状面,选择默认226个Hounsfield单位的骨阈值,并生成所有肩关节的掩模。然后使用掩模的智能分割功能(Split)将肱骨与肩部其他骨骼分离。再次应用智能分割功能分离肱骨各个骨折块(图1b)。将分离后的肱骨骨折块三维模型导入3-matic Research 13.0软件中,并通过旋转和平移复位骨折碎片(图1c)。对87个右侧肱骨模型进行镜像翻转,使其方向与左侧肱骨吻合。参考标志包括肱骨大结节、小结节、肱骨头、肱骨解剖颈、肱骨外科颈,用以校准和标准化。得到重建后的肱骨三维实体,以STL格式输出(图1d)。

1.2.2 肱骨模板的建立 一名健康志愿者(男性,27岁,身高172 cm,已签署知情同意书)行西门子64层螺旋CT(120 kV,350 mA,层厚≤1.5 mm)扫描。扫描范围为左肘关节至肩关节,扫描后将DICOM格式的扫描数据导入Mimics Research 21.0软件中。使用软件智能分割功能分离肱骨、肩胛骨掩模,使用智能扩展和智能填充功能完成对肱骨整体的掩模覆盖,然后生成三维实体,以STL格式保存作为肱骨模板。将STL格式的肱骨模板导入E-3D medical 18.08软件中,作为下一步骨折地图绘制的模板使用。

1.2.3 肱骨近端三维骨折地图的构造 将复位后的肱骨三维实体导入E-3D medical 18.08软件中。肱骨的三维实体通过旋转、空间移动与肱骨模板实现最大程度重合(图1e)。配准后,在肱骨模板上绘制肱骨近端骨折线(图1f)。然后采用骨折分析功能将所有骨折线叠加生成三维热图。骨折线越接近,权重就越高。然后将肱骨模板上骨折线的线图和热图输出到标准的俯视图、左视图、前视图、右视图、后视图中。骨折线的密度在3D热图中显示,从深蓝色(低密度)到红色(高密度),见图2。

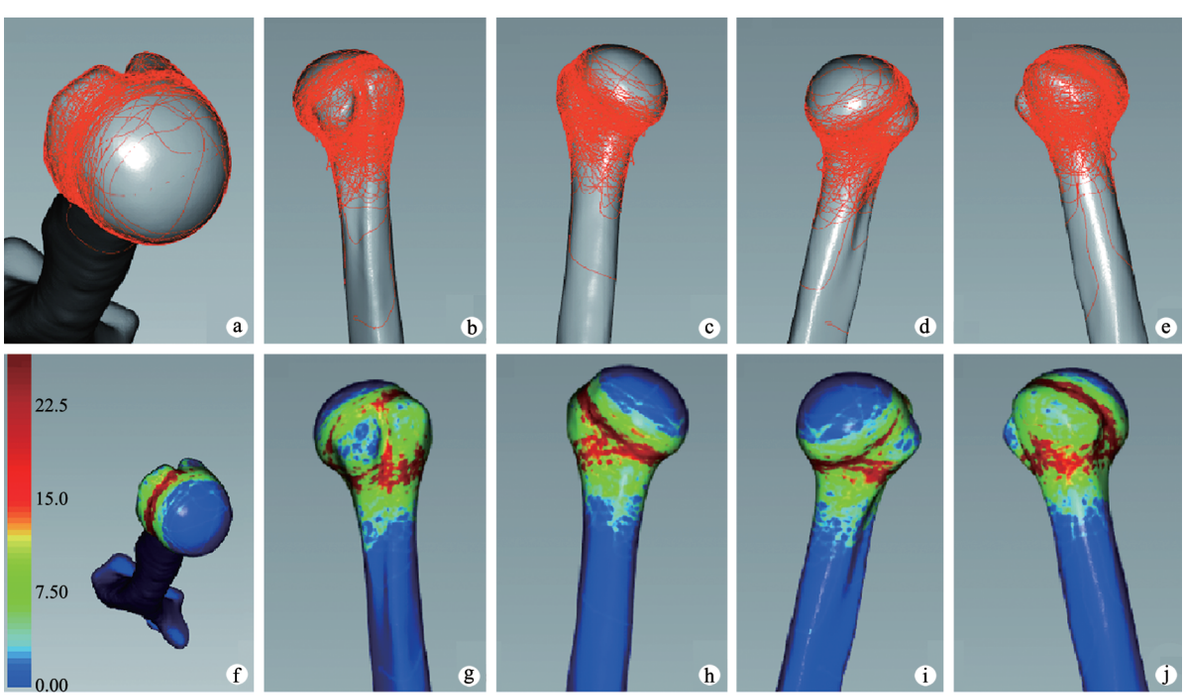
1.2.4 肱骨近端骨折测量 将复位后的肱骨三维实体导入E-3D medical 18.08软件中。在肱骨的三维实体上手动选择单个样本所有骨折线的最低点并标记,同时依靠软件自带直尺功能,找到肱骨头最高点并标记,然后测量两点之间的直线距离并记录,表示骨折位置。线段通过三维实体内部,为空间直线距离(单位:mm)。

1.2.5 统计学方法 所有统计学分析均使用The *jamovi project* (2021). *jamovi* (Version 1.6) [Computer Software]. Retrieved fromhttps://www.jamovi.org进行。连续性变量采用均数±标准差($\bar{x}\pm s$)表示,分类变量以频率和百分比进行描述。采用线性回归分析年龄、性别、患肢的左右侧与骨折位置的相关性,$P<0.05$为差异有统计学意义。骨折形态图谱分析采用描述性分析。



a:骨折CT图像智能分离肩关节骨骼(Mimics Research 21.0软件);b:智能分离肱骨各骨折块(Mimics Research 21.0软件);c:手动复位肱骨各骨折块(3-matic Research 13.0软件);d:复位重建后以STL格式导出(3-matic Research 13.0软件);e:骨折模型与模板配准重合(E-3D medical 18.08软件);f:在模板上绘制骨折线(E-3D medical 18.08软件)

图1　肱骨近端骨折地图流程图



a～e:骨折线图的俯视图、左视图、前视图、右视图、后视图;f～j:骨折热图的俯视图、左视图、前视图、右视图、后视图

图2　全体肱骨近端骨折线图和热图

2　结果

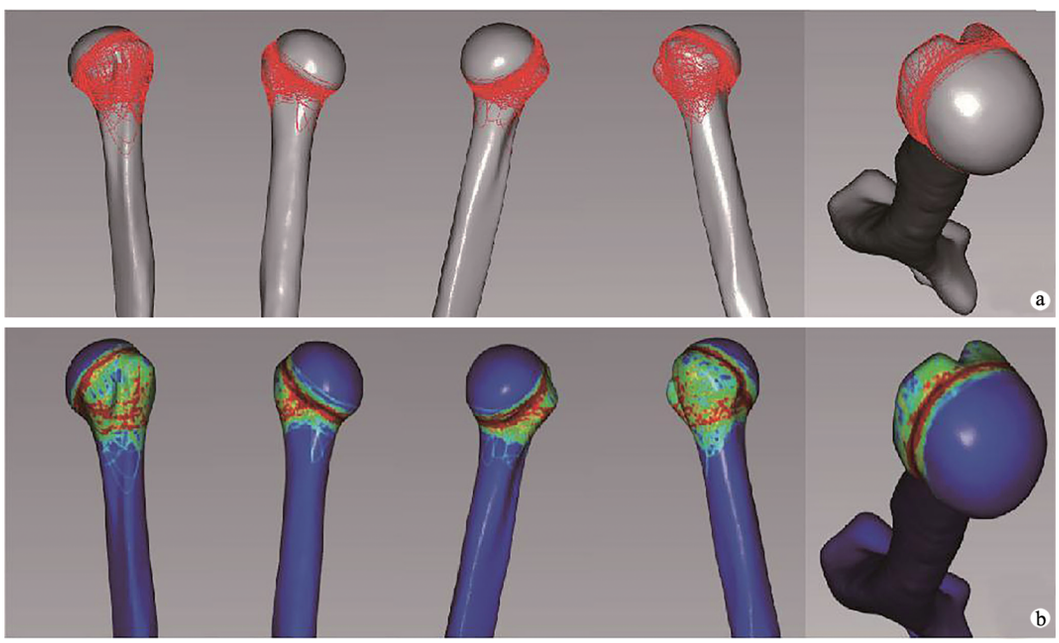
2.1　肱骨近端骨折线总体3D分布特征

从肱骨近端三维实体热图可以观察到:骨折线集中围绕肱骨头基底分布,肱骨头部骨折线分布稀疏。在大结节区域,骨折线围绕大结节基底分布,而大结节部分骨折线分布也比较密集。在小结节区域,骨折线围绕小结节基底分布,而小结节骨折线分布稀疏。在肱骨解剖颈处,骨折线分布也很密集,呈环形分布。

因此,肱骨近端骨折线集中于肱骨头基底、大结节基底、小结节基底、肱骨解剖颈分布(图2)。

2.2 肱骨近端4部分骨折3D分布特征

从左视图可见,累及大结节的红色条带沿着结节间沟外侧缘纵行向近端走行至大结节最高点,累及小结节的红色条带较宽,在小结节中下部横向延伸至肱骨头内侧基底,肱骨外科颈外侧出现3条红色细小条带向内侧环绕延伸。右视图可见,红色条带延伸到后内侧后,汇成一条,围绕肱骨头基底部。前视图可见从小结节延伸过来的红色条带继续围绕肱骨头基底部走行。后视图和俯视图均可见红色条带围绕肱骨头基底部,与总视图基本一致(图3)。



a:4部分骨折线图的左视图、前视图、右视图、后视图、俯视图;b:骨折热图的左视图、前视图、右视图、后视图、俯视图

图3 肱骨近端4部分骨折线图和热图

2.3 肱骨近端4部分骨折典型骨折三维重建图特征

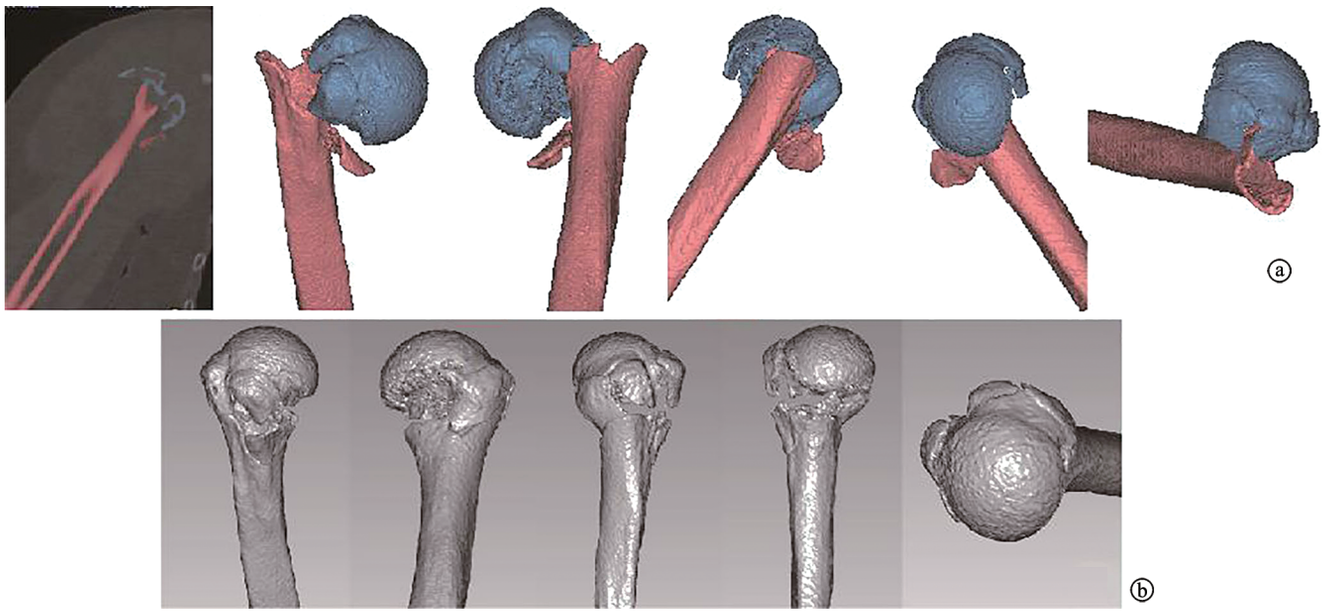
从三维重建图中可以看出,肱骨近端碎裂为典型4部分,即分离的肱骨大结节、小结节、肱骨头及肱骨干。外侧可见肱骨外科颈环状骨折线延伸至肱骨头基底,肱骨大结节分离,骨折线从其中部穿过至肱骨头外侧基底部。前内侧可见小结节移位,骨折线位于其基底部。肱骨头因挤压而向前内侧旋转移位、嵌塞,肱骨干则向后外侧移位,内侧头下骨折碎块分离(图4)。

2.4 肱骨近端骨折测量结果

将肱骨头最高点至骨折线最低点的空间距离作为骨折位置的量化数据,将所有患者的年龄、性别、患肢的左右侧与骨折位置进行相关性分析。以长度为因变量,患者的年龄、性别、患肢的左右侧为自变量进行简单线性回归分析。然后使用多元线性回归模型来解释长度与自变量之间的关系和影响。简单线性回归结果显示,仅性别和骨折位置显著相关($P<0.01$)。多元线性回归结果显示,加入年龄后,性别与骨折位置的相关性更加显著($P<0.001$),见图5。男性和女性骨折类型分布不同,女性肱骨头最高点至骨折线最低点的距离明显短于男性,女性肱骨外科颈外侧部位的骨折线更靠近肱骨头一侧,男性则相对远离肱骨头。年龄、患肢的左右侧和长度无相关性。

3 讨论

近年来,CT三维重建技术在骨折诊断和分类中得到广泛应用,比X射线更直观、更准确。然而,传统的骨折分类方法能否通过3D-CT重建技术得到改进,需要进一步研究。骨折地图技术基于“大数据”揭示了骨折线的形态特征及好发部位,为骨折诊断、骨折分类、治疗方案选择、手术固定设计、骨折易发部位统计、标准化骨折模型的制定提供了新的方法及依据。骨折地图分为二维(2D)地图和三维(3D)地图,2D骨折地图只能分析骨折线在某一面的走向和分布,而3D地图可以直观地分析骨折线的形态特征。自2009年以来,骨折地图已被广泛应用于描绘肩胛骨骨折[5]、Pilon骨折[10]、胫骨平台骨折[7-8]及桡骨关节面骨折[11]等各类骨折。而研究也从简单的骨折线分布显示发展到热图显示,热图显示也从2D热图到3D热图。本研究采用肱骨近端骨折薄层扫描CT数据进行三维重建,



a:典型4部分骨折的冠状位CT图像和骨折复位前各方向视图的三维实体(使用Mimics Research 21.0软件创建);b:典型4部分骨折复位后各方向视图的三维实体(使用3-matic Research 13.0软件创建)

图4 肱骨近端4部分骨折三维实体

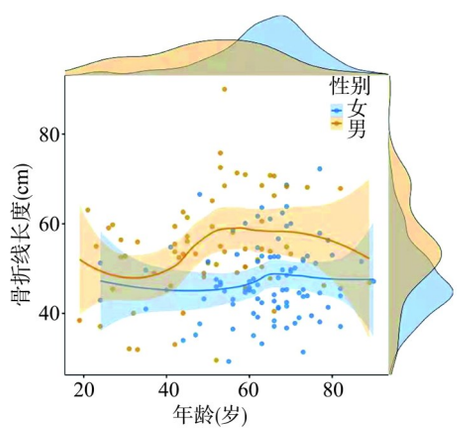


图5 骨折线长度-年龄-性别散点图

然后将三维实体进行复位,再与标准模板进行配准,随后在模板上绘制3D骨折线,可更直观、定量地生成热图,显示肱骨近端骨折形态特征和集中趋势。后期通过三维视觉手术模拟和有限元分析,可以得到最精确的矫形方案。陈凯等[12]将基于CT数据的3D打印技术应用于儿童发育性髋关节脱位手术中,发现其可以显著缩短手术时间,减少术中出血量,提高手术成功率,改善预后,为患儿提供更精准、个体化的诊疗方案[12]。未来,我们可以基于VR/AR技术和骨科临床图像大数据,进一步分拆量化骨骼,推进骨科智能化诊疗建设。

有学者在研究低能量创伤的肱骨近端骨折与骨质疏松症的关系中发现,50岁以上的肱骨近端骨折患者中,女性骨质疏松性肱骨近端骨折的发生率高于男性[13],本研究骨折热图显示的结果与之基本一致。本研究结果显示,骨折线位置与性别显著相关,女性骨折线位置与男性相比更靠近近端;随着年龄的增加,骨折线位置与性别相关性更加显著,年龄越大,骨折线越偏近端。Scola等[14]在对肱骨近端局部骨质量与骨折类型关系的研究中发现,肱骨近端后内侧区域存在"肱骨距"结构,骨密度最高。本研究中骨折线的分布情况与以上研究相似,肱骨颈内下位置的骨折线主要集中在肱骨头基底部,而在肱骨距较为少见。从3D热图各个视图可以看出,肱骨头基底热区条带狭窄集中,无明显性别差异。当外力作用导致关节内骨折,均不同程度导致肱骨头基底骨折,可能与本身解剖结构的脆弱性、骨密度低于周围结构相关。而肱骨外科颈外侧区域热区条带较分散,有很明显的性别差异,外科颈后内侧区域周围出现冷区,热区条带形态规则且跨过"肱骨距"上方。本研究结果与上述研究对肱骨近端骨质分配、骨骼强度不同和骨折线走行分布可相互印证。

本研究中最常见的肱骨近端骨折类型是4部分骨折(53.7%),骨折热图显示肱骨外科颈前外侧的红色区域较其他位置集中度不高,呈现3条带状分布,其中偏向近端的红色区域以女性为主,偏向远端的红色区域以男性为主。肱骨近端4部分骨折属肩关节内骨折,存在肩袖损伤、关节囊破裂、关节盂骨折等并发症,上肢功能修复要求高,因此肱骨近端的解剖形态和良好的复位对维持肩关节的正常功能和预防肱骨头远期磨损坏死具有重要意义。通过该骨折地图研

究,外科医生可明确4部分骨折线最常累及位置和骨折线稀疏的区域,将内固定头尾部置于骨折线稀疏区域,通过骨折线集中区域,可使骨折固定更加稳定,从而降低内固定失败的风险。切开复位加锁定钢板内固定是目前治疗4部分肱骨近端骨折最合适的选择[15-16]。目前大多数医生认为在保证坚强固定的前提下,钢板的放置应尽可能偏向远端,以避免肩关节撞击症的发生。本研究的骨折地图提示,对于老年患者的4部分骨折,尤其是女性,固定在肱骨外科颈外侧的钢板应尽量偏向近端,才能保证骨折坚强固定,避免内固定失败。

基于传统X射线及CT提出的Neer、AO分类是世界上使用最广泛的分类系统,但在诊断肱骨近端骨折的临床应用中,其可重复性较差,导致其在观察者间和观察者内存在争议[15]。针对Neer分类的局限性,有学者提出了Hertel分类法,但在使用Hertel分类研究肱骨近端骨折过程中,与现有文献的比较和参考十分困难[17]。现有传统分型未能考虑年龄及性别因素所导致的分型差异。本研究绘制的肱骨近端骨折线的热图是三维立体化图,可以为Neer分类的改良提供参考证据,对创造一种新的骨折分类方法有一定启示作用。

目前,关于肱骨近端骨折的生物力学特性所知甚少。当下关于其生物力学的研究中,骨折切割方式均是基于传统分型,和实际骨折累及情况存在一定差异,应用3D技术进行生物力学的研究鲜有报道。本研究明确了肱骨近端骨折线权重最高的区域,提供标准的肱骨近端骨折模型,可为未来生物力学和有限元分析研究肱骨近端的切割建模提供一定的参考。但是,本研究也存在不足。第一,由于肱骨的个体解剖差异,使骨折实体并不能与模板完全重合,手动绘制骨折线的过程会与真实骨折线走行有一定误差,所以骨折地图的定性评价也存在一定的局限性。未来应在三维重建技术上进一步优化,同时结合形态统计技术以获得更理想的结果。第二,本研究是小样本量的单中心研究,结果可能会有偏倚。第三,没有建立一个新的分类系统。

综上,本研究通过骨折地图技术描述肱骨近端骨折线的形态学特征,具有一定的先进性。研究结果有助于临床深入了解肱骨近端骨折线分布规律,从而进行新的骨折分类系统制定、治疗方案选择、手术固定设计、骨折部位统计,同时也为生物力学实验提供更符合实际的切割模型。

[参考文献]

[1] Lorenz G, Schönthaler W, Huf W, et al. Complication rate after operative treatment of three- and four-part fractures of the proximal humerus: locking plate osteosynthesis versus proximal humeral nail[J]. Eur J Trauma Emerg Surg, 2021, 47(6): 2055-2064. doi: 10.1007/s00068-020-01380-7.

[2] Hohenberger GM, Schwarz AM, Dauwe J, et al. Evaluation of screw placement in proximal humerus fractures regarding drilling manoeuvre and surgeon's experience[J]. Injury, 2021, 52: S22-S26. doi: 10.1016/j.injury.2020.02.120.

[3] Neer CS. Displaced proximal humeral fractures. I. classification and evaluation[J]. J Bone Joint Surg Am, 1970, 52(6): 1077-1089.

[4] Martin JS, Marsh JL. Current classification of fractures. Rationale and utility[J]. Radiol Clin North Am, 1997, 35(3): 491-506.

[5] Armitage BM, Wijdicks CA, Tarkin IS, et al. Mapping of scapular fractures with three-dimensional computed tomography[J]. J Bone Joint Surg Am, 2009, 91(9): 2222-2228. doi: 10.2106/JBJS.H.00881.

[6] Zhang Y, Sun Y, Liao S, et al. Three-dimensional mapping of medial wall in unstable pertrochanteric fractures[J]. Biomed Res Int, 2020, 2020: 8428407. doi: 10.1155/2020/8428407.

[7] Yao X, Zhou K, Lv B, et al. 3D mapping and classification of tibial plateau fractures[J]. Bone Joint Res, 2020, 9(6): 258-267. doi: 10.1302/2046-3758.96.BJR-2019-0382.R2.

[8] Molenaars RJ, Mellema JJ, Doornberg JN, et al. Tibial plateau fracture characteristics: computed tomography mapping of lateral, medial and bicondylar fractures[J]. J Bone Joint Surg Am, 2015, 97(18): 1512-1520. doi: 10.2106/JBJS.N.00866.

[9] Zhan Y, Zhang Y, Xie X, et al. Three-dimensional fracture mapping of multi-fragmentary patella fractures (AO/OTA 34C3)[J]. Ann Transl Med, 2021, 9(17): 1364. doi: 10.21037/atm-21-1814.

[10] Cole PA, Mehrle RK, Bhandari M, et al. The pilon map: fracture lines and comminution zones in OTA/AO type 43C3 pilon fractures[J]. J Orthop Trauma, 2013, 27(7): e152-e156. doi: 10.1097/BOT.0b013e318288a7e9.

[11] 王郑浩,李开南,汪学军,等. 基于三维CT的关节内桡骨远端骨折地图研究[J]. 中华骨科杂志, 2019, 39(22): 1373-1380. doi: 10.3760/cma.j.issn.0253-2352.2019.22.003.

[12] 陈 凯,何 玲,陈 欣. 基于CT数据的3D打印技术在儿童发育性髋关节脱位手术中的应用[J]. 局解手术学杂志, 2021, 30(6): 491-493. doi: 10.11659/jjssx.12E020084.

[13] Taskesen A, Göçer A, Uzel K, et al. Effect of osteoporosis on proximal humerus fractures[J]. Geriatr Orthop Surg, 2020, 11: 1466730697. doi: 10.1177/2151459320985399.

[14] Scola A, Gebhard F, Weckbach S, et al. Mechanical quantification of local bone quality in the humeral head: a feasibility study[J]. Open Orthop J, 2013, 7: 172-176. doi: 10.2174/1874325001307010172.

[15] Lauren LN, Niloofar D, Michael DM, et al. Plate fixation for management of humerus fractures[J]. Injury, 2018, 49(Suppl 1): S33-S38. doi: 10.1016/S0020-1383(18)30300-0.

[16] Moro GL, Mezzadri U, Mancini N, et al. The "FraMo" system: a new mini-invasive technique in the treatment of proximal humerus fractures[J]. Tech Hand Up Extrem Surg, 2019, 23(3): 102-110. doi: 10.1097/BTH.0000000000000246.

[17] Laux CJ, Grubhofer F, Werner CML, et al. Current concepts in locking plate fixation of proximal humerus fractures[J]. J Orthop Surg Res, 2017, 12(1): 137. doi: 10.1186/s13018-017-0639-3.

(编辑:刘 艺)