DOI:10.16016/j.1000-5404.201906035

应用高频超声评估儿童股骨骨折牵引治疗的疗效

陈 俊,刘 星,张 润,周 尹,曹银强,刘 涛,袁小伟 400014 重庆,重庆医科大学附属儿童医院骨一科,儿童发育疾病研究教育部重点实验室,儿童发育重大疾病国家国际科技合作基地,儿科学重庆市重点实验室

[**摘要**] **目的** 探讨高频超声动态评估儿童股骨骨折前及治疗后疗效的应用价值。**方法** 利用高频超声和X线检查同时对62例行牵引治疗的股骨骨折患儿在伤后第1、2、3、4周进行随访观察,观察骨折周围软组织损伤(如肌肉、血管等)情况,骨折的成角、移位情况及骨痂周围血供(测量血流阻力指数RI)及骨痂长度和厚度,对比两者之间首次检测到骨痂的时间及骨痂长度、厚度显示情况。**结果** 超声和X线最早显示骨痂时间对比具有统计学差异($P<0.05$),提示高频超声对于骨痂形成的显示早于X线检查;在第2、3周检查骨痂长度及厚度,超声和X线存在统计学差异($P<0.05$),提示高频超声显示的骨痂厚度及长度大于X线;与X线检查相比,第4周时超声的骨痂显示量没有统计学差异。**结论** 高频超声能动态显示骨折对位对线情况,早期显示骨折断端周围软组织损伤(如肌肉、血管等)及骨痂的生长情况,且高频超声与X线在检测骨性骨痂的应用中具有一致性,是一种安全无辐射的骨骼系统检查方法。

[**关键词**] 股骨骨折;牵引;X线检查;高频超声;儿童
[**中图法分类号**] R445.1; R454.4; R683.42 [**文献标志码**] A

High frequency ultrasound in evaluation of traction efficacy among children with femoral fractures

CHEN Jun, LIU Xing, ZHANG Run, ZHOU Yin, CAO Yinqiang, LIU Tao, YUAN Xiaowei First Department of Orthopaedics, Key Laboratory of Child Development and Disorders of Ministry of Education, China International Science and Technology Cooperation Base of Child Development and Critical Disorders, Chongqing Key Laboratory of Pediatrics, Children's Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing, 400014, China

[**Abstract**] **Objective** To explore the application of high frequency ultrasound in evaluation of traction treatment for femoral fracture in children. **Methods** A total of 62 children with femoral fracture and undergoing traction treatment in our department from March 2017 to December 2018 were recruited in this study. High frequency ultrasound and X-ray plain filming were used respectively to detect them at admission and at 1, 2, 3 and 4 weeks after the initial fracture occurred. The soft tissue injury (muscles and vessels) around the fracture, angle and displacement of the fracture, blood supply around the osteotylus (resistance index, RI), and length and thickness of the osteotylus during fracture healing were observed and monitored. The results obtained by ultrasound were compared with X-ray in terms of the time of the first detection of osteotylus and the size of the osteotylus. **Results** Ultrasound and X-ray showed statistically significant difference in the first indication of callus ($P<0.05$), with that of former earlier. In the 2nd and 3rd weeks, statistical differences were seen in length and thickness of the osteotylus between the ultrasound and X-ray examination ($P<0.05$), with those of ultrasound longer and thicker. But no such differences were observed at the 4th week between the 2 methods. **Conclusion** High frequency ultrasound can dynamically present the fracture line, and early display the damage of soft tissue (such as muscles, blood vessels, etc.) around the fracture site and the growth of the osteotylus. High frequency ultrasound has consistent results with X-ray examination in the detection of bony callus, and is a safe non-radiative skeletal system examination.

[**Key words**] femur fracture; traction; X-ray examination; high frequency ultrasound; children

Supported by the Natural Science Foundation of Chongqing (CSTC2018jcyjax0.259) and the Key Project of Chongqing Health Committee (2019ZDXM047).
Corresponding author: LIU Xing, E-mail: liuxingda@126.com

[**基金项目**] 重庆市自然科学基金(CSTC2018jcyjAX0.259);重庆市卫健委重点项目(2019ZDXM047)
[**通信作者**] 刘 星,E-mail:liuxingda@126.com

股骨骨折是儿童骨科常见的疾病之一,约占儿童骨折的10%[1],尤其好发于低年龄儿童。与成人股骨骨折不同,儿童股骨血供丰富,骨折具有较强的愈合能力,因此,大部分低年龄儿童股骨骨折在牵引治疗下能获得较好的预后。由于牵引治疗时间相对较长,在整个治疗过程中需要持续监测骨折断端对位、对线情况,并且在股骨骨折愈合过程中需要密切关注骨痂的生长情况。对于采用牵引治疗的股骨骨折患儿,常采用床旁X线进行定期复查。但床旁X线检查不仅会对患儿本身产生辐射,同样极有可能对同一病房的其他患儿造成辐射。这可能对儿童的生长发育造成不同程度的影响。与X线检查不同,超声检查具有简便、费用低廉、无电离辐射等优点。近年来,已有研究将高频超声逐渐应用于骨折的诊断及治疗[2-3]。为了探讨高频超声在评估儿童股骨骨折牵引治疗中骨折愈合情况,本研究对62例采用牵引治疗的股骨骨折病例的高频超声和X线检查结果进行对比分析。

1 资料与方法

1.1 研究对象

收集2017年3月至2018年12月我科儿童股骨骨折并且使用牵引治疗的病例,共计62例,其中男性40例,女性22例。年龄(2.6±1.6)岁(3个月至5岁2个月),中位年龄为1.8岁。受伤原因车祸伤20例,摔伤36例,重物砸伤5例,门压伤1例。病例均为闭合性骨折。参与本研究的患者及其家属均签署知情同意书,且本研究已获得我院伦理委员会的批准[(2019)年伦审(研)第117号]。

1.2 仪器与检查方法

使用Philips-CX50彩色超声诊断仪,选用高频线阵探头L3-12,探头频率12 MHz。床旁X光机选用日本产R-20C限束器,最高管电压150 kVP。高频超声检查方法:在骨折所对应皮肤表面涂抹耦合剂,再用高频探头根据患儿具体的病情采取相应的体位,在骨折处皮肤表面的前面、内侧及外侧(水平牵引)或者前后面、内外侧(臀式牵引)作横、纵切扫查,判断骨皮质强回声光带连续性中断的位置,骨折断端有无成角、移位、分离及短缩,骨折周围有无软组织嵌插、血肿形成及肌纤维离断;检测骨痂时注意其出现时间、形态、大小及其与周围组织的关系。X线检查方法:根据患儿体位使用床旁X光机拍摄患侧股骨正位片。

1.3 统计学方法

采用SPSS 20.0统计软件进行分析,计数资料采用χ^2检验;计量资料以$\bar{x}\pm s$表示,正态分布数据采用t检验,检验水准$\alpha=0.05$。

2 结果

2.1 患儿骨折基本情况

分别对62例骨折患儿进行了高频超声和X线检查,其中45例患儿使用水平皮牵引,17例患儿使用臀式皮牵引。检查结果提示62例骨折患儿中,左侧股骨骨折32例,右侧股骨骨折30例;上段骨折10例,中上段骨折10例,中段骨折34例,中下段骨折2例,下段骨折6例(表1),病例均牵引4周,4周后采用支具固定。

表1 患儿骨折分布情况(例)

分布	上段	中上段	中段	中下段	下段	合计
左侧	4	4	20	2	2	32
右侧	6	6	14	0	4	30
合计	10	10	34	2	6	62

2.2 骨折检查结果

2.2.1 高频超声观察骨折断端 纵切面扫查时,高频超声显示骨折断端可见骨皮质强回声连续性中断,两断端间错位,呈现出"阶梯状",部分病例可见到断端重叠、成角,粉碎性骨折时可见大小不一的碎骨片。横切面扫查时,骨折断端可见双骨断面半环形连续性中断的带状回声,其后方伴有声影(图1)。62例患儿中,高频超声检查发现有8例出现骨折周围较大血肿(图2),有4例出现肌纤维断裂(图3)。

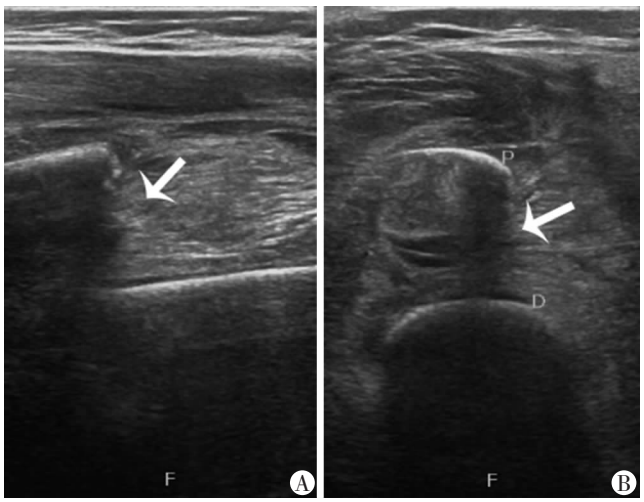
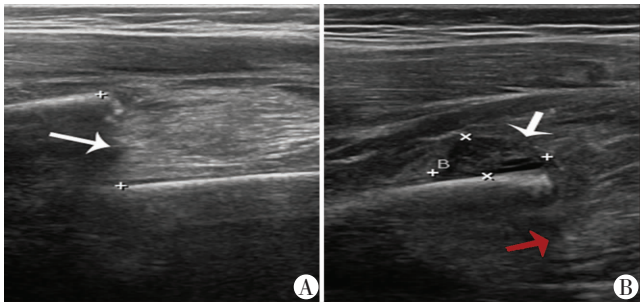


图1 高频超声观察骨折断端纵切面(A,箭头示)和横切面(B,箭头示)



图 2　骨折断端血肿高频超声观察(箭头示)



A:骨折断端肌纤维断裂(白色箭头);B:骨折断端合并血肿(白色箭头)及肌纤维裂(红色箭头)

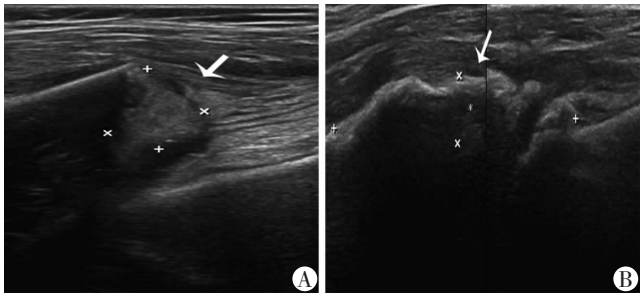
图 3　骨折断端肌纤维断裂高频超声观察

2.2.2　X 线观察骨折断端　　骨折时床旁 X 线片检查结果提示骨皮质连续性中断,部分病例可见骨折断端移位、成角。

2.3　*骨折牵引治疗后检查结果*

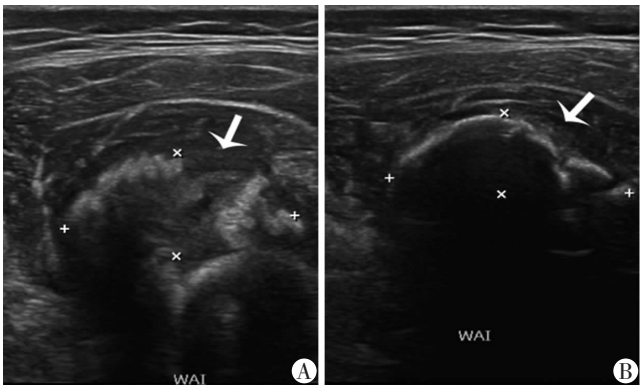
2.3.1　高频超声观察骨痂　　监测骨痂生长时,骨折纵切面扫查早期可见骨断端周围逐渐出现斜坡形或不规则形纤维性骨痂,回声稍低,分布不均匀,呈蜂窝样改变(图 4A)。后期骨痂范围增大,回声增强,密度增加,骨折线逐渐模糊,将骨折断端连接在一起。声像图提示骨痂密度进一步增强,呈板层状排列,骨折线模糊至完全消失,将骨折断端完全连接在一起,高频超声已不能透过骨痂(图 4B)。横切面扫查声像图显示同纵切面,在骨折断端周围逐渐有骨痂生长,密度逐渐增加,最后形成一个不规则半环形带状回声(图 5)。通过高频超声还可以观察骨折部位骨痂周围的血供情况,测量出血流阻力指数,以此来预估骨痂的生长情况(图 6)。

2.3.2　X 线观察骨痂结果　　随着骨折的愈合,骨折周围出现不规则斑点状、团块状、条片状高密度影,密度逐渐增高,X 线与高频超声早期、中期、后期对骨折周围显示见图 7~9。



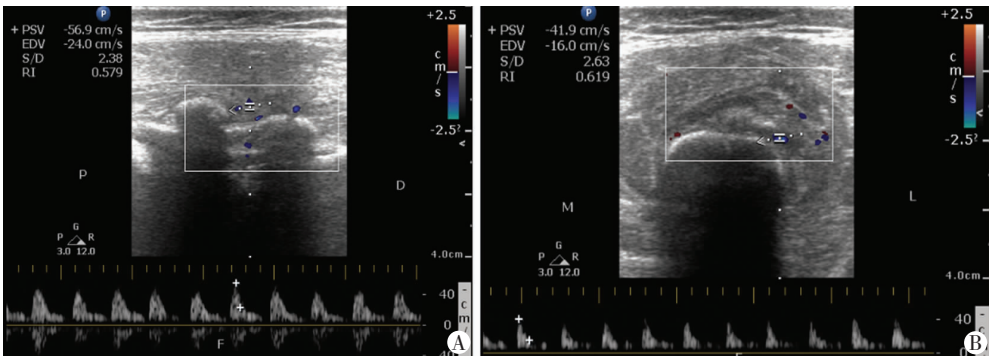
A:纤维性骨痂(箭头示);B:骨性骨痂(箭头示)

图 4　骨折断端纵切面骨痂高频超声观察



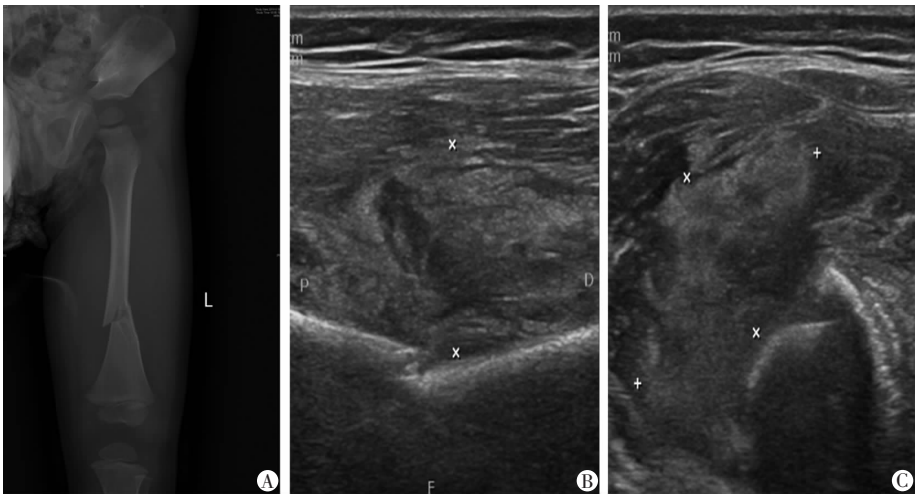
A:纤维性骨痂(箭头示);B:骨性骨痂(箭头示)

图 5　骨折断端横切面骨痂高频超声观察



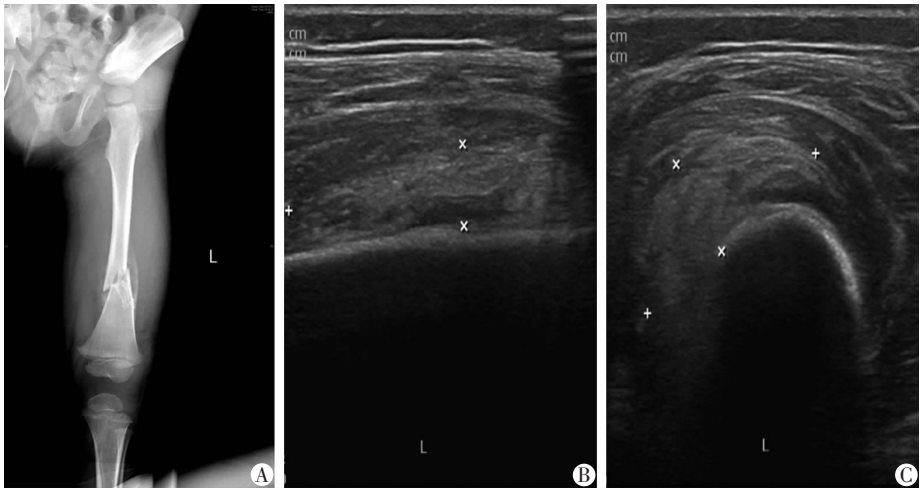
A:骨折前侧纵切面骨痂血供(RI=0.579);B:骨折前侧横切面骨痂血供(RI=0.619)

图 6　骨折断端周围骨痂血供高频超声观察



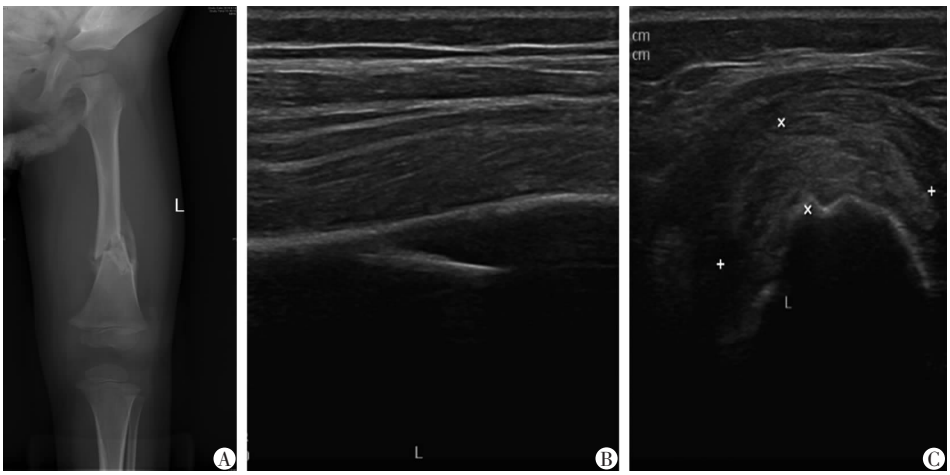
A:床旁 X 线片观察;B:外侧纵轴高频超声观察;C:外侧横轴高频超声观察

图 7 高频超声及 X 线观察骨折早期骨痂



A:床旁 X 线片观察;B:外侧纵轴高频超声观察;C:外侧横轴高频超声观察

图 8 高频超声及 X 线观察骨折中期骨痂



A:床旁 X 线片观察;B:外侧纵轴高频超声观察;C:外侧横轴高频超声观察

图 9 高频超声及 X 线片观察骨折后期骨痂

2.4 两种检查方法结果分析

高频超声最早可检测到骨痂的时间为(9.5±2.4)d,X线最早可检测到骨痂的时间为(14.3±2.2)d,两种检测方法对比差异具有统计学意义($P<0.05$)。高频超声与X线第1周可监测到骨痂生长的分别有32、2例,骨痂长度及厚度与高频超声比较具有统计学差异($P<0.05$);高频超声与X线第2周可监测到骨痂生长的分别有62、54例,骨痂长度及厚度与高频超声比较具有统计学差异($P<0.05$);高频超声与X线第3周可监测到骨痂生长的均为62例,骨痂长度及厚度与高频超声比较具有统计学差异($P<0.05$);高频超声与X线第4周可监测到骨痂生长的均为62例,骨痂长度及厚度与高频超声比较没有统计学差异(表2)。

表2 第1~4周高频超声与X线片检查骨痂大小对比分析(cm,$\bar{x}\pm s$)

时间	骨痂大小	超声	X线片	P值
第1周	骨痂长度	2.10±0.96	1.95±0.17	0.000
	骨痂厚度	0.52±0.20	0.67±0.06	0.000
第2周	骨痂长度	4.09±1.14	3.43±1.23	0.039
	骨痂厚度	0.89±0.27	0.64±0.27	0.003
第3周	骨痂长度	4.70±1.24	4.01±1.32	0.039
	骨痂厚度	1.08±0.33	0.81±0.24	0.000
第4周	骨痂长度	4.89±1.24	4.88±1.24	0.986
	骨痂厚度	1.17±0.34	1.14±0.32	0.767

3 讨论

儿童骨骼最明显的特征是生长发育,因此儿童骨折的处理原则是避免损伤骨骺及骺生长板造成生长发育障碍,多数骨折采取保守治疗可获得满意效果。其中牵引治疗是小年龄儿童股骨骨折的主要治疗方法之一。由于儿童处于生长发育时期,成骨细胞、破骨细胞丰富而活跃,血液循环旺盛,骨折愈合迅速,所以牵引治疗过程中需要及时复查骨折断端位线情况及骨痂生长情况,了解是否存在牵引位置不当、过度牵引及骨折愈合程度。目前最常用于复查的手段是床旁X线,但是由于频繁X线的暴露及基层医院床旁X线机的缺乏为股骨骨折的复查带来了诸多困扰。而超声作为无辐射的检查方法,早已应用于软组织、肌肉等疾病的检查。近年来也逐渐开始应用于骨骼系统疾病的诊断与治疗。

随着社会逐渐发展,人们生活水平及认知水平逐渐提高,患者不再满足于仅仅挽救生命,也逐渐担心诊疗过程中的放射性损伤,尤其是对于孕妇及儿童。根据美国2015年关于致癌物第13项报告内容(13th U.S. Report on Carcinogens),X线已经被正式确认为淋巴瘤、肺癌、甲状腺癌、白血病的致病因素之一[4]。且已有国外研究者长时间随访接受过放射检查的儿童,发现辐射能够导致甲状腺癌的发生率升高[5-6]。所以寻找在诊疗过程中不对患者产生额外损伤的检查方法是医学发展的必然趋势。

NERI等[2]采用超声对204例手部骨折进行检查,结果提示敏感度为91.5%,特异度为96.8%。HERREN等[3]使用超声对201例儿童前臂骨折进行检查,敏感度及特异度均达99.5%。WEINBERG等[7]研究指出超声诊断儿童长骨骨折的敏感性为73%、特异性为92%,诊断非长骨骨折的敏感性、特异性分别为77%、93%,并认为超声对长骨与非长骨骨折的诊断价值相似。常洪波等[8]使用超声诊断微小移位的肋骨骨折,准确率为99%,并且认为超声可以检测到0.5 mm以上的骨折移位。虽然放射检查仍是骨折诊断的金标准,但超声作为一种补充或替代方法,因其无辐射、方便易操作、诊断准确率高等优势,近年来临床应用愈加广泛。

目前在C臂引导下进行闭合复位微创固定治疗四肢长骨骨折的技术已日趋成熟,但C臂下长时间反复透视不可避免地给医患带来一定程度的放射损伤。在使用超声引导下行肝肾穿刺、神经阻滞麻醉时,能清晰地观察到穿刺针在软组织中的具体位置。有学者[9-11]将超声应用于骨折复位固定治疗中,并且取得了满意的效果。沈先涛等[12]在超声引导下行克氏针撬拨复位经皮穿针固定治疗桡骨颈骨折,术后3个月X线复查提示优良率为100%,功能恢复优良率为100%。

由于高频超声对软组织显像的特异性,有研究发现,超声能够评估骨膜反应的血管化程度,这对骨痂生长可行性有一个预期性评估[13]。如有学者认为,血流阻力指数(RI)和血管密度在骨折愈合的前期达到最高,并且从骨折后3~4周开始逐渐降低[14-15]。根据CARUSO等[16]的研究,认为当RI<0.6时,可预示骨痂血供较好,骨折愈合较快;当RI>0.7时,骨痂血供较差,骨折愈合不良。

本研究中显示,应用高频超声可发现骨痂的出现早于X线4.8 d,平均时间为9.5 d。第2、3周两种检查方法对骨痂的显示具有统计性差异,我们考虑是因为前期骨痂多数为纤维骨痂,超声能显示软性骨痂,而

X线需要骨痂钙盐含量达到25%时目测才能分辨[17]。并且在末次检查时可检测到骨痂生长的量(长度与厚度)与X线的检查结果没有统计性差异,证明了两种检测手段在检测骨性骨痂的应用中具有一致性。在应用高频超声检查过程中,可以发现骨折周围血肿的形成、肌纤维离断的多少及是否有软组织嵌插,这可以帮助我们在临床中更好地与家属进行沟通,同时早期对牵引进行不同程度的调整。通过在骨折周围纵向、横向及斜向的动态扫查,可以清楚地观察到骨折的形态及错位的程度、方向。这是X线检查所不具备的。监测骨痂时超声可以明确显示股骨骨折各个位置骨痂生长的快慢,并且通过动态的扫查,清楚地看到骨折四周不同部位骨痂的生长情况,据此我们可以调整理疗方案,促进骨折更快的愈合。超声还能够检测骨痂周围血流情况,如彩色多普勒血流显像(CDFI)及血流阻力指数(RI)的检测,以此可以预估骨痂生长情况,这是X线所不能替代的。而且由于其没有放射性损伤,可以进行多次验证,且患儿家属配合度高。

现阶段对于骨折愈合时间的评估主观性强,缺乏金标准,因此骨折愈合时的定量评价也是一个研究热点。已有研究者使用双能X线、定量CT等来检测骨痂的生成量,但是由于没有统一的正常参考值且均具有辐射性损伤,故应用不广泛[18-19]。使用超声对骨痂进行定量检测时不仅可以检测骨痂的大小,还可通过骨痂后方声影的消失情况来预示骨的钙化情况[20-21]。当然,骨折的愈合不仅取决于骨痂的数量,还要看骨痂的力学性能,而且骨折的愈合具有个体差异,需要根据不同的情况作个体化的评估方案。

本研究的不足之处在于样本量较少,而且虽然高频超声可以显示骨折的形态,骨折线的走向,但是其对于骨折整体的力线显示尚不如X线。但是随着超声技术的发展、三维超声的应用,超声极有可能取代X线作为牵引治疗小儿股骨骨折过程中的监测方法。

综上所述,高频超声作为一种新兴的、无辐射的骨骼系统检查方法,由于其简便性和易行性,以及在动态扫查时对骨折、骨折线、骨痂的评估作用,可以作为儿童股骨骨折牵引治疗中骨折愈合程度的监测方法。

参考文献:

[1] MANSOOR K, SHAHNAWAZ S, AHMAD A, *et al*. Epidemiology of childhood fractures in the city of Karachi[J]. J Ayub Med Coll Abbottabad, 2015, 27(3): 608-612.

[2] NERI E, BARBI E, RABACH I, *et al*. Diagnostic accuracy of ultrasonography for hand bony fractures in paediatric patients[J]. Arch Dis Child, 2014, 99(12): 1087-1090. DOI:10.1136/archdischild-2013-305678.

[3] HERREN C, SOBOTTKE R, RINGE M J, *et al*. Ultrasound-guided diagnosis of fractures of the distal forearm in children [J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2015, 101(4): 501-505. DOI:10.1016/j.otsr.2015.02.010.

[4] ZHANG Y, CHEN Y, HUANG H, *et al*. Diagnostic radiography exposure increases the risk for thyroid microcarcinoma: a population-based case-control study[J]. Eur J Cancer Prev, 2015, 24(5): 439-446. DOI: 10.1097/CEJ.0000000000000169.

[5] OLSZYNSKI W P, BROWN J P, ADACHI J D, *et al*. Multisite quantitative ultrasound for the prediction of fractures over 5 years of follow-up: the Canadian multicentre osteoporosis study[J]. J Bone Miner Res, 2013, 28(9): 2027-2034. DOI:10.1002/jbmr.1931.

[6] SHULAN J M, VYDRO L, SCHNEIDER A B, *et al*. Role of biomarkers in predicting the occurrence of thyroid neoplasms in radiation-exposed children[J]. Endocr Relat Cancer, 2018, 25(4): 481-491. DOI:10.1530/ERC-17-0408.

[7] WEINBERG E R, TUNIK M G, TSUNG J W. Accuracy of clinician-performed point-of-care ultrasound for the diagnosis of fractures in children and young adults[J]. Injury, 2010, 41(8): 862-868. DOI:10.1016/j.injury.2010.04.020.

[8] 常洪波, 李炳辉, 刘颖, 等. 高频超声诊断肋软骨骨折[J]. 中华超声影像学杂志, 2000(3): 180-181.
CHANG H B, LI B H, LIU Y, *et al*. Diagnosing costicartilage fracture by high frequency ultrasound[J]. Chin J Uitrason, 2000(3): 180-181.

[9] 张志桐, 申素芳, 胡长青, 等. 超声监测下长骨骨折复位髓内针固定术的可行性初探[J]. 中国医疗设备, 2014, 29(3): 161-163, 192.
ZHANG Z T, SHEN S F, HU C Q, *et al*. Feasibility of long bone fractures with intramedullary nail fixation under ultrasound monitoring[J]. China Med Devices, 2014, 29(3): 161-163, 192.

[10] TURNER A L, STEVENSON M D, CROSS K P. Impact of ultrasound-guided femoral nerve blocks in the pediatric emergency department[J]. Pediatr Emerg Care, 2014, 30(4): 227-229. DOI:10.1097/PEC.0000000000000101.

[11] KODAMA N, TAKEMURA Y, UEBA H, *et al*. Ultrasound-assisted closed reduction of distal radius fractures[J]. J Hand Surg Am, 2014, 39(7): 1287-1294. DOI:10.1016/j.jhsa.2014.02.031.

[12] 沈先涛,陈小亮,李雄,等.B型超声引导经皮克氏针撬拨治疗儿童桡骨颈骨折[J].中华小儿外科杂志,2015,36(5):363-367. DOI:10.3760/cma.j.issn.0253-3006.2015.05.011.
SHEN X T, CHEN X L, LI X, *et al*. Ultrasound guided percutaneous Kirschner-wire leverage and reduction for radial neck fracture in children[J]. Chin J Pediatr Surg, 2015,36(5):363-367. DOI:10.3760/cma.j.issn.0253-3006.2015.05.011.

[13] 胡定祥, 林达强, 唐天生, 等. 骨折患者术前凝血及纤溶功能对术后血栓栓塞症的风险预测[J]. 医学研究杂志, 2015, 44(7): 162-164.
HU D X, LIN D Q, TANG T S, *et al*. Items of blood coagulation and fibrinolysis in preoperative patients with fracture on risk prediction of vein thrombosis[J]. J Med Res, 2015, 44(7): 162-164.

[14] MESSINA A, FRASSANITO L, COLOMBO D, *et al*. Hemodynamic changes associated with spinal and general anesthesia for hip fracture surgery in severe ASA Ⅲ elderly population: a pilot trial[J]. Minerva Anestesiol, 2013, 79(9): 1021-1029.

[15] GARCIA L, JAFF M R, METZGER C, *et al*. Wire-interwoven nitinol stent outcome in the superficial femoral and proximal popliteal arteries: twelve-month results of the SUPERB trial[J]. Circ Cardiovasc Interv, 2015, 8(5): e000937. DOI: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.113.000937.

[16] CARUSO G, LAGALLA R, DERCHI L, *et al*. Monitoring of fracture calluses with color Doppler sonography[J]. J Clin Ultrasound, 2000, 28(1): 20-27. DOI:10.1002/(sici)1097-0096(200001)28:1<20::aid-jcu3>3.0.co;2-w.

[17] BOUTIS K, GROOTENDORST P, WILLAN A, *et al*. Effect of the low risk ankle rule on the frequency of radiography in children with ankle injuries[J]. CMAJ, 2013, 185(15): E731-E738. DOI:10.1503/cmaj.122050.

[18] SCHAMBACH S J,BAG S,SCHILLING L,*et al*. Application of micro-CT in small animal imaging[J]. Methods (San Diego, Calif.),2010,50(1):2-13. DOI:10.1016/j.ymeth.2009.08.007.

[19] 尹东, 杨惠林, 唐天驷, 等. 双能X线骨密度仪测定骨痂骨密度变化的实验研究[J]. 中国医学影像学杂志, 2004, 12(6): 430-432.
YIN D, YANG H L, TANG T S, *et al*. Experimental study on bone mineral density changes of callus during fracture healing[J]. Chin J Med Imaging, 2004, 12(6): 430-432.

[20] GUO X S, YANG D, ZHANG D, *et al*. Quantitative evaluation of fracture healing process of long bones using guided ultrasound waves: a computational feasibility study[J]. J Acoust Soc Am, 2009, 125(5): 2834-2837. DOI: 10.1121/1.3106526.

[21] GHEDUZZI S, DODD S P, MILES A W, *et al*. Numerical and experimental simulation of the effect of long bone fracture healing stages on ultrasound transmission across an idealized fracture[J]. J Acoust Soc Am, 2009, 126(2): 887-894. DOI:10.1121/1.3158938.

(**收稿**:2019-06-06;**修回**:2019-09-06)

(编辑 张 维)