

文章编号: 1004-7220(2024)04-0651-06

利用克氏针治疗儿童股骨远端骨骺损伤的有限元分析

王晓明, 王晓威, 白桓安, 杨亚婷, 颀强
(西安交通大学附属红会医院儿童病医院, 西安 710054)

摘要:目的 研究不同构型克氏针治疗儿童 SH-II 型骨骺损伤的稳定性差异以及对骺板的损伤情况。方法 利用 1 名 8 岁患儿健侧股骨 CT 数据, 将图像数据导入 Mimics 21.0 中建立粗略股骨、骨骺模型, 再导入 Geomagic 2013 中构建得到曲面化模型。将上述模型在 SolidWorks 2018 中与 3 种克氏针构型(分散克氏针、双交叉克氏针、单交叉克氏针)完成装配后导入 ANSYS Workbench 2019 中, 通过对装配体的不同力学加载模拟现实中的多种运动模式, 分析骨折块的最大位移以及克氏针、骺板、骨折块 von Mises 应力分布及最大应力。结果 分散克氏针、双交叉克氏针、单交叉克氏针组的最大位移分别发生外展(2.39 mm)、内收(2.12 mm)、外展(2.21 mm)运动时, 骺板最大应力分别发生在外展(1.22 MPa)、前屈(0.20 MPa)、后伸(0.29 MPa)运动时。结论 双交叉克氏针构型针的稳定性优于分散布针及单交叉克氏针, 并且对骨骺损伤最小。

关键词: 儿童骨折; 骨折固定; 骨骺; 股骨骨折; 克氏针; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.04.012

Finite Element Analysis of Kirschner Wire Treatment for SH-II Distal Femoral Fracture in Children

WANG Xiaoming, WANG Xiaowei, BAI Huan'an, YANG Yating, JIE Qiang

(Pediatric Orthopaedic Hospital, Honghui Hospital, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Objective To compare the stability of different Kirschner wire configurations for treating SH-II type epiphyseal injury and damage to the epiphyseal plate in children. **Methods** The CT scanning data of a healthy femur from an eight-year-old child were collected; the image data were imported into Mimics 21.0 to establish a rough femoral and epiphyseal model, which was then imported into Geomagic 2013 to construct a surface model. The surface model was assembled in SolidWorks 2018 with three configurations (dispersed, double-crossed, and single-crossed K-wires) and then imported into ANSYS Workbench 2019. Various motion modes in reality were simulated through different mechanical loadings on the assembly. The maximum displacement of the fracture fragment, von Mises stress distribution, and maximum stress on the K-wire, epiphyseal plate, and fracture fragment were analyzed. **Results** The maximum displacements of the dispersed, double-crossed, and single-crossed K-wire groups occurred during abduction (2.39 mm), adduction (2.12 mm), and abduction (2.21 mm), and the maximum stress on the epiphyseal plate occurred during abduction (1.22 MPa), anterior flexion (0.20 MPa), and posterior extension (0.29 MPa), respectively. **Conclusions** The stability of the double-crossed K-wire configuration is superior to that of the dispersed and single-crossed K-wire configurations, with minimal damage to the epiphysis.

Key words: pediatric fracture; fracture fixation; epiphyses; femoral fracture; Kirschner wire; finite element analysis

收稿日期: 2024-01-16; 修回日期: 2024-01-18

基金项目: 陕西省创新能力支撑计划-科技创新团队(2020TD-036), 国家骨科与运动康复临床医学研究中心创新基金科研项目(2021-NCRC-CXJJ-ZH-06), 陕西省儿童骨骼畸形与损伤疾病临床医学研究中心(2020LCZX-03)

通信作者: 颀强, 主任医师 E-mail: jieqiangchina@126.com

股骨作为人体下肢的主要负重骨,在承重及运动环节扮演重要角色,损伤后须牢靠固定以满足正常的生理运动需求。股骨骨折在儿童人群中的发病率较高,达到11%~13%。骨折部位多见于股骨干部及股骨远端,交通事故及车祸为主要病因^[1-2]。与成人骨性结构不同的是,儿童的长骨两端存在负责生长发育的骨骺结构,故骨骺损伤成为这一年龄段所特有的损伤。儿童股骨远端骨骺损伤占有骨骺损伤的比例小于2%^[3]。尽管发病率较低,但股骨远端邻近膝关节,参与关节活动及肢体承重。此外,股骨远端骨骺负责其远端的生长延长,损伤后易增加后期肢体生长紊乱的风险,包括各种形式的下肢生长轴线发育异常,例如肢体不等长、膝内外翻。因此,选用适合儿童的固定方式显得尤为重要^[4]。目前,儿童股骨远端骨骺损伤的手术治疗方式以克氏针固定为主。考虑到骨骺的结构,钢板及弹性髓内针等固定方式并不能跨越骨骺实现固定,故而应用较少。对于骨骺损伤的分型,Salter-Harris分型系统最为广泛应用,其中II型骨骺损伤最为常见,指骨骺分离伴干骺端骨折,骨折线通过骺板并累及干骺端的一部分,骨折碎块往往呈三角形。受限于骨折位置及干骺端碎块的大小,克氏针固定有多种不同的布局方式,需要结合患者条件及术者经验多方面考量^[5]。而不同的布局方式之间存在固定稳定性的差异,对骨骺的损伤情况也不尽相同。本文采用有限元方法,建模儿童股骨远端Salter-Harris II型(SH II)损伤后常见的几种克氏针构型,并对比其力学稳定性,以及其对骺板的损伤情况。

1 材料和方法

1.1 有限元模型建立

1.1.1 三维模型建立 选取1名外伤导致左侧股骨远端骨折在西安交通大学附属红会医院儿童骨病医院住院的儿童患者,年龄8岁,身高128 cm,体质量35 kg(患儿及家属知情同意,并签署知情同意书)。X线检查患者右侧股骨无疾病且骨质良好。采用螺旋CT平扫右侧股骨全段,球管电压120 kV,电流150 mA,扫描层厚1 mm。扫描范围包含全段右侧股骨,获取DICOM数据格式后以光盘刻录保存。再以保存的右侧股骨远端数据作为样本,将二维DICOM

格式数据导入Mimics 21.0中,通过建立蒙版、区域增长、阈值分割、智能填充等命令建立粗略股骨的模型。随后通过反向建模,在骨的阈值下提取出股骨远端骨骺与干骺端中间低于该阈值的区域,建立骺板区域蒙版,并填充为实体。检查无蒙版缺失后将其导入Geomagic Studio 2013中,对模型进行三角面片细分、降噪、去除特征、光滑等处理,得到股骨与骺板的三维模型。将上述模型导入SolidWorks 2018中建模儿童股骨远端SH II型骨骺损伤及骨骺结构。切割1条靠近股骨外侧干骺端部分的骨折线,模拟SH II型骨骺损伤。最终制作的模型包括股骨干、股骨远端骨骺以及骺板[见图1(a)]。

1.1.2 骨折模型建立 根据临床内固定器材数据,使用SolidWorks 2018构建如下3种内固定结构:
① 分散克氏针组。3枚直径2.0 mm克氏针,长度略长于骨皮质表面,分散布针,不超出远端皮质;
② 双交叉克氏针组。内外侧各2枚直径2.0 mm平行克氏针交叉布针;
③ 单交叉克氏针组:内外侧各1枚直径2.0 mm平行克氏针交叉布针,干骺端骨折块单独以1枚2.0 mm克氏针固定[见图1(b)]。随后,在SolidWorks 2018中将股骨三维模型与3种内固定模型装配到一起。

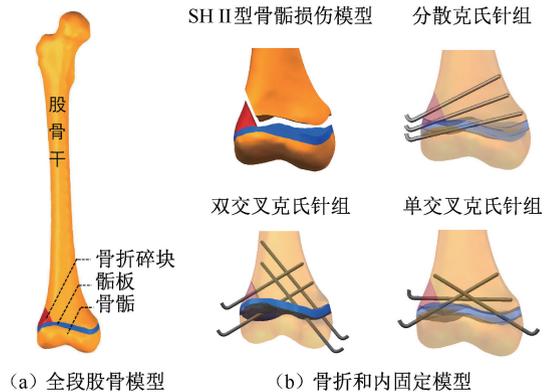


图1 模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the model (a) Full-segment femur model, (b) Fracture and internal fixation models

1.1.3 载荷、边界条件和结果分析 将上述模型导入ANSYS Workbench 2019中进行静态分析,设置肱骨和内固定物的材料参数(见表1)^[6-7]。由于儿童骨骺及骨质形态不规则,且骨质不均匀缺乏规律,故将所有模型材质简化,分区域均设为均匀体,即

所有材料均为连续、线性、各向同性和均匀的弹性材料。SH II 型骨折指干骺端骨折及骨骺分离的损伤,本文假定骨折面完全断裂,且处于完全接触状态。骨折面被定义为摩擦接触。摩擦因数为 0.2^[8],其余接触类型被定义为绑定。通过网格收敛性分析后无最大应力点。收敛后分散克氏针组、双交叉克氏针组、单交叉克氏针组模型的单元数分别为 275 901、321614、276 440,节点数分别为 461 486、576 284、465 440。

表 1 不同材料的材料参数

Tab. 1 Material parameters of different materials

材料	E/GPa	ν
皮质骨	17.00	0.30
松质骨	0.84	0.20
克氏针	210.00	0.30
骨骺	0.005	0.46

在随后的操作中,首先限制股骨远端关节面在各方向上的位移,对股骨头施加-350 N 轴向载荷模拟单腿负重情况(垂直压缩工况)。将股骨近端表面所有节点约束为 0 自由度,限制所有维度的位移以防止模型的刚体运动。分别对股骨远端骨折块施加前、后、内、外方向 150 N 力,以及股骨远端施加旋内及旋外 150 N·mm 旋转力,分别模拟下肢在前屈、后伸、内收、外展、内旋及外旋运动时肌肉对骨骼的牵拉(见图 2)。

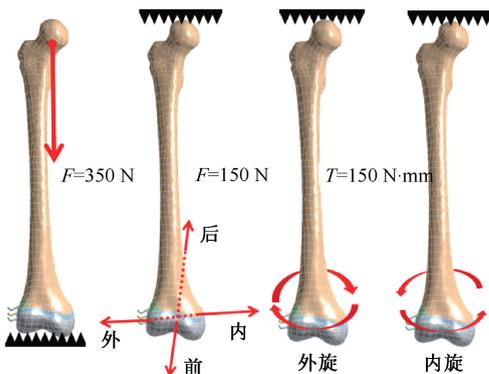


图 2 载荷施加示意图

Fig. 2 Schematic diagram of load application

1.2 评价指标

股骨远端骨折块的最大位移;内固定、骺板、骨折块 von Mises 应力分布及最大应力。

2 结果

2.1 轴向载荷工况

在垂直压缩工况下,分散克氏针组模型骨折块的 von Mises 应力最小,为 143.35 MPa;双交叉克氏针组模型骺板及克氏针的 von Mises 应力最小,分别为 2.22、835.24 MPa。说明对骺板损伤最小的是双交叉克氏针组模型(见图 3)。

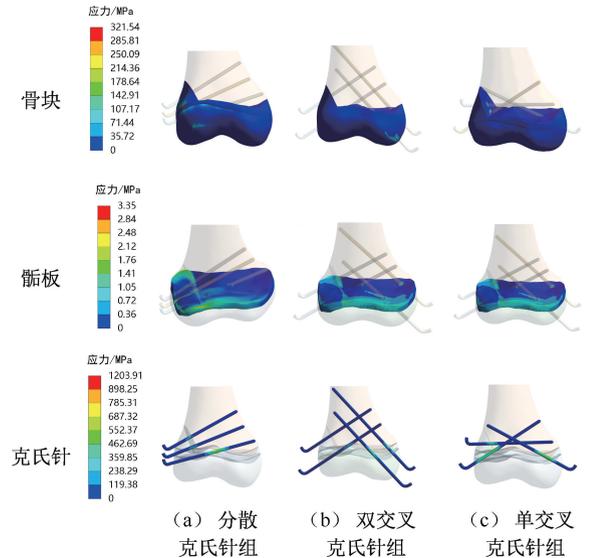


图 3 轴向载荷下 3 种模型 von Mises 应力云图

Fig. 3 Von Mises stress contours of three models under axial loads (a) Dispersed K-wires group, (b) Double-crossed K-wires group, (c) Single crossed K-wires group

2.2 弯曲旋转工况

2.2.1 骨折块最大位移 3 种模型在运动工况下骨折块最大位移均发生在股骨远端附近。分散克氏针组、双交叉克氏针组、单交叉克氏针组的最大位移分别发生在外展(2.39 mm)、内收(2.12 mm)、外展(2.21 mm)运动时,最小位移分别发生在外旋(0.057 mm)、内旋(0.015 mm)、外旋(0.017 mm)运动时[见图 4(a)、图 5(a)]。

2.2.2 内固定、骨折块和骺板最大应力 3 种模型中,克氏针以及骨折块的最大应力多发生在骺板-骨质交界区域。其中,分散克氏针组、双交叉克氏针组、单交叉克氏针组克氏针的最大应力分别发生在外展(970.46 MPa)、前屈(384.61 MPa)、后伸(526.36 MPa)运动时,骨折块的最大应力分别发生在外展(153.56 MPa)、后伸(51.74 MPa)、前屈(81.46 MPa)运动时。而骺板的最大应力除了发生

在克氏针-骺板交界区外,还会发生在骨折块-骺板交界区域以及骺板的边缘区域。分散克氏针组、双交叉克氏针组、单交叉克氏针组骺板最大应力分别发生外展(1.22 MPa)、前屈(0.20 MPa)、后伸(0.29 MPa)运动时[见图4(b)、图5(b)]。

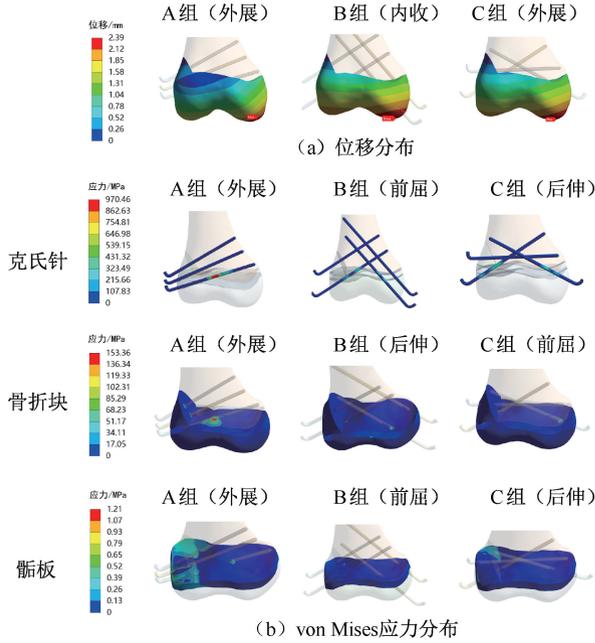


图4 旋转工况下3种模型位移和应力云图

Fig. 4 Displacement and stress contours under rotation

(a) Displacement distributions, (b) Von Mises stress distributions

注:A、B、C组分别为分散克氏针组、双交叉克氏针组、单交叉克氏针组。

3 讨论

儿童骨折的治疗理念与成人不同,其最大区别在于骨骺损伤的处理,以及在治疗时对后期生长发育的考量。在处理股骨远端骨折合并骨骺损伤时,

除了进行妥善固定外,也需要尽可能减少对骨骺的二次损伤,以降低后期对患儿生长发育的影响。临床中SH II型骨骺损伤的治疗主要以克氏针固定为主,取得了令人满意的临床治愈结果。本文利用有限元技术分析不同克氏针构型对骨折稳定性的影响。本文认为,使用骨折块的最大位移反映是否牢靠固定,而应力说明对骨及骺板的损伤程度。结果显示,双交叉克氏针组最大位移为3组中最小,但在部分工况下的位移会略大于单交叉克氏针组(前屈)。而综合整体的稳定程度考虑,双交叉克氏针组具有更优的力学稳定性。结合内固定以及骨折块的最大应力发现,这种布局可以更好地分散应力,对骺板的损伤也最小,是一种理想的布局方式。

下肢轴线发育异常是股骨远端骨骺损伤令人不能忽视的并发症之一,主要包括各种原因导致的膝关节内外翻畸形,例如骨桥形成、单侧骨骺生长缓慢。目前研究认为,直径小于2 mm光滑克氏针过骺不会引起生长紊乱^[9],本研究使用的所有克氏针直径均为2.0 mm。分散克氏针组、单交叉克氏针组有2枚克氏针穿过了骨骺,而双交叉克氏针组是3枚,但结果显示,双交叉克氏针组双交叉克氏针结构对骺板的损伤却低于其余两组,说明在一定数量的克氏针内,增加克氏针数量并不会对增加对骨骺的损伤,反而对骺板的应力有良好的分散作用。对于需要手术固定的患儿来说,合适的固定方式会减少手术损伤及术后并发症,获得更好的手术效果^[10]。由于骺板的特殊结构,单纯石膏固定后骨折再移位风险高,即使闭合复位成功,也需要内固定以保持骨折复位的稳定^[11]。本文结果则表明,双交叉克氏针构型的稳定性优于其余两种构型。

实际的手术操作中,骨折复位往往较为困难,

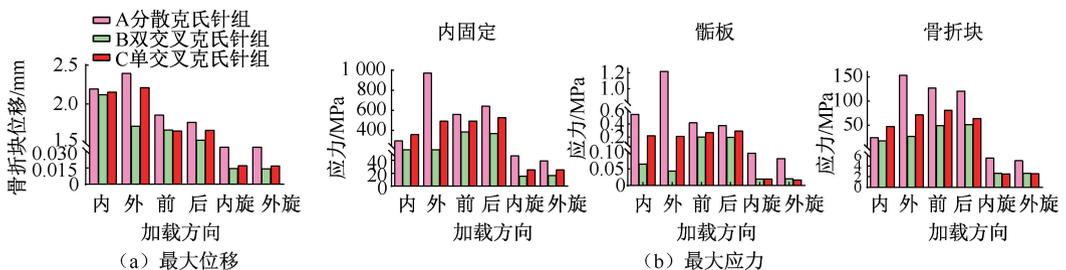


图5 不同工况下股3种模型最大位移和应力比较

Fig. 5 Comparison of the maximum displacement and stress of three models under different motions (a) The maximum displacement, (b) The maximum von Mises stress

如果骨折的移位平面与膝关节活动平面一致,远折端则不易把持,维持复位困难。有学者建议采用股骨远端闭合克氏针维持复位^[12]。克氏针因此操作简便,并发症小,在骨折固定中得到广泛应用。此类损伤应首先考虑闭合复位克氏针固定,如果干骺端骨块足够大,单纯使用克氏针无法满足固定需求时。也有学者提出 90°钢板、滑动钢板及干骺端螺钉固定等理想方法,使内固定物不穿过骺板,减少骺板损伤,也能应对粉碎程度较大的远端骨折^[10,13-15]。

Inal 等^[16]使用有限元方法对交叉构型与平行构型对 SH II 型骨骺损伤的骺板应力,提出交叉构型对骺板应力损伤更小。本文使用患儿特定的骺板模型也得到了相似的结论。本文发现,双交叉克氏针组模型表现了最小 von Mises 骨骺应力及骨折块应力,对骨骺的损伤最小,更有利于骨折愈合。骨骺损伤会因为患儿年龄损伤类型、骨折的移位程度和骨折类型等因素对骨骺生长造成影响^[17]。Salter-Harris 骨骺分型根据骨折块、骨骺、干骺端的位置将骨骺损伤分为 VI 型,部分移位较小的 I 型和 II 型可以尝试保守的支具治疗,而移位较大则需要进行手术干预^[10],主要包括经皮或开放的克氏针固定、螺钉固定、滑动钢板和外固定架等。螺钉及钢板操作不当则对骨骺的损伤较大,尽管滑动钢板可以解决固定牢靠性以及传统钢板对骨骺的纵向抑制,但创伤较大,国内目前应用较少^[18-19]。周立国等^[18]提出 Ilizarov 技术治疗儿童股骨远端骨骺损伤,也取得了良好的效果。损伤的形式主要表现为骺板早闭或骨桥形成,使受累肢体会出现生长发育异常或周线紊乱,影响肢体功能。加之这一部位临近膝关节,骨折固定时容易影响关节功能。因此,有学者建议切开复位骨折固定时尽量采用简单的固定器械,减少手术暴露时的损伤,争取更好的膝关节功能,并认为根据儿童股骨远端骺损伤类型的不同,采用克氏针、空心钉或两者相结合进行固定,手术损伤较小,可达到固定的稳定及满意疗效,降低手术并发症^[10]。然而 Adams 等^[20]研究表明,手术固定并不能减少并发症的发生,但可以降低移位的风险。周亚东^[21]在治疗小儿骨折的病例中则认为,在软组织损伤较严重时,大范围的手术剥离等会进一步加深损伤,影响局部血运,增加感染几率,

导致皮肤并发症及骨折延迟愈合。而无论是切开复位还是闭合复位,这一部位的固定均应追求小的二次骨骺损伤及解剖力线的满意。

下肢轴线在负重及行走步态中起到了重要作用^[22]。在儿童与青少年时期,股骨远端骨骺损伤往往要求达到满意复位,保持股四头肌、腓绳肌有正常的力线,减少手术过程中带来的二次损伤。不充分的复位容易造成膝关节的内外翻畸形,金森峰等^[12]研究认为,在远期塑形的调节下,前后角存在 15°的成角可自行纠正,不会有明显的屈膝障碍。从远期来看,青少年骨骺骨折愈合及塑形能力虽强,但骨骺骨折后其损伤的部位难以准确预见,若不恰当处理,会增加创伤性关节炎风险^[23]。

本研究的局限性如下:① 本文模拟时没有使用多例不同的患儿 CT 数据进行建模,而是根据单一患儿特定数据生成了骺板模型,对皮质骨与松质骨也使用了均一的弹性材料。对骨折模型和内固定细节的简化,虽然一定程度减低了个体差异及不规则骨对实验结果带来的影响,但也与真实模型产生了差距,需要不断改进。② 患儿特定的下肢运动由肌肉及韧带在股骨中段的附着完成,运动模式复杂。本文没有使用肌肉及韧带的附着对各方向运动进行模拟,而是通过对骨折远端施加各个方向的力来完成。这是对骨折模型稳定性的测试,没有对真实的运动情况进行模拟。③ 本文初步比较 3 种不同内固定模型生物力学特性,进一步的比较需要更大规模的临床研究,以验证实验结果的可靠性。

4 结论

本文建立了儿童股骨远端 Salter-Harris II 骨骺损伤模型,并构建分散克氏针、双交叉克氏针、单交叉克氏针构型 3 种固定模型。通过有限元方法对骨折块的稳定性进行研究,同时分析骺板的最大应力及其分布,认为双交叉克氏针可以获得最优的固定稳定性及较小的骨骺损伤。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:王晓明负责实验设计和论文撰写;王晓威负责数据处理和模型合理性验证;白桓安和杨亚婷负责模型制作及软件分析;颌强负责研究指导和论文修改。

参考文献:

- [1] HEIDEKEN J, SVENSSON T, BLOMQVIST P, *et al.* Incidence and trends in femur shaft fractures in Swedish children between 1987 and 2005 [J]. J Pediatr Orthop, 2011, 31(5): 512-519.
- [2] SALONEN A, LAITAKARI E, BERG HE, *et al.* Incidence of femoral fractures in children and adolescents in Finland and Sweden between 1998 and 2016: A binational population-based study [J]. Scand J Surg, 2022, 111(1): 1997074429.
- [3] DUFF S, GELFER Y, TROMPETER A, *et al.* The clinical features, management options and complications of paediatric femoral fractures [J]. Eur J Orthop Surg Traumatol, 2021, 31(5): 883-892.
- [4] MUHAMMAD H, FILZA MR, SIWENDRO AB, *et al.* Pediatric neglected distal femoral fracture with growth arrest [J]. Int J Surg Case Rep, 2022(93): 106929.
- [5] 吴卫宾, 杜云峰, 王红星, 等. 外固定架三维结构固定儿童股骨远端A型骨折[J]. 中国微创外科杂志, 2022, 22(5): 436-440.
- [6] TU Y, LIU Y, YANG W, *et al.* Temperature rise simulation during a kirschner pin drilling in bone[C]//Proceedings of 2009 3rd International Conference on Bioinformatics & Biomedical Engineering. Beijing: IEEE, 2009.
- [7] LI J, WANG M, ZHOU J, *et al.* Finite element analysis of different screw constructs in the treatment of unstable femoral neck fractures [J]. Injury, 2020, 51(4): 995-1003.
- [8] LAMDAN R, LIEBERGALL M, GEFEN A, *et al.* Pediatric supracondylar humerus fractures: Effect of bone-implant interface conditions on fracture stability [J]. J Child Orthop, 2013, 7(6): 565-569.
- [9] SONG KS, KANG CH, MIN BW, *et al.* Closed reduction and internal fixation of displaced unstable lateral condylar fractures of the humerus in children [J]. J Bone Joint Surg Am, 2008, 90(12): 2673-2681.
- [10] 郭志雄, 朱伦庆, 刘尧, 等. 不同方法治疗儿童股骨远端骨骺骨折[J]. 临床骨科杂志, 2022, 25(2): 268-271.
- [11] LITTLE RM, MILEWSKI MD. Physeal fractures about the knee [J]. Curr Rev Musculoskelet Med, 2016, 9(4): 478-486.
- [12] 金霖峰, 叶性璞, 朱伟军. 手术治疗儿童与青少年股骨远端骨骺损伤[J]. 临床骨科杂志, 2016, 19(6): 755.
- [13] YUAN BJ, STANS AA, LARSON DR, *et al.* Excision of physeal bars of the distal femur, proximal and distal tibia followed to maturity [J]. J Pediatr Orthop, 2019, 39(6): e422-e429.
- [14] 郑浩, 王丽丽, 刘勇, 等. 骨骺滑动钢板固定复杂儿童股骨远端骨折[J]. 中国矫形外科杂志, 2023, 31(4): 376-378.
- [15] ZHANG YJ, WANG YJ, WANG SH, *et al.* Application of distal femoral 90 degrees locking plate in children with supracondylar femoral fractures [J]. Eur Rev Med Pharmacol Sci, 2023, 27(17): 7956-7967.
- [16] INAL S, GOK K, GOK A, *et al.* Comparison of biomechanical effects of different configurations of kirschner wires on the epiphyseal plate and stability in a salter-harris type 2 distal femoral fracture model[J]. J Am Podiatr Med Assoc, 2019, 109(1): 13-21.
- [17] DAHL WJ, SILVA S, VANDERHAVE KL. Distal femoral physeal fixation: Are smooth pins really safe? [J]. J Pediatr Orthop, 2014, 34(2): 134-138.
- [18] 周立国, 董长红, 夏建军, 等. Ilizarov 技术在儿童股骨远端骨骺损伤中的应用[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2016, 31(12): 1305-1306.
- [19] 洪加源, 郭林新, 练克俭, 等. 跨骨骺滑动钢板固定治疗复杂儿童股骨远端骨折的近期临床报告[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2011, 26(6): 490-492.
- [20] ADAMS AJ, MAHMOUD M, WELLS L, *et al.* Physeal fractures of the distal femur: Does a lower threshold for surgery lead to better outcomes? [J]. J Pediatr Orthop B, 2020, 29(1): 40-46.
- [21] 周亚东. 内固定外置治疗儿童胫骨开放性骨折[J]. 生物骨科材料与临床研究, 2015, 12(4): 73-74.
- [22] 代菁, 马剑雄, 柏豪豪, 等. 股骨内翻和胫骨内翻的运动学和足底压力分析[J]. 医用生物力学, 2023, 38(3): 561-567.
- [23] DAI J, MA JX, BAI HH, *et al.* Kinematics and plantar pressure analysis of varus femur and varus tibia [J]. J Med Biomech, 2023, 38(3): 561-567.
- [23] 黄辉, 罗宇, 吕欣, 等. 闭合复位经皮穿针治疗儿童胫腓骨远端骨骺、干骺端骨折[J]. 中国矫形外科杂志, 2018, 26(16): 1521-1524.