

pain score[J]. J Med Res, 2013, 42(12): 144-146. Chinese.

[13] CHOI H R, STEINBERG M E, CHENG E Y. Osteonecrosis of the femoral head; diagnosis and classification systems[J]. Curr Rev Musculoskelet Med, 2015, 8(3): 210-220.

[14] 杨洋, 许长鹏, 陈涯, 等. 经大粗隆双通道减压植骨加异体腓骨支撑治疗股骨头坏死的近期疗效观察[J]. 中国骨伤, 2021, 34(6): 534-538.
YANG Y, XU C P, CHEN Y, et al. Short term effect of double channel decompression and bone grafting via greater trochanter combined with allograft fibula propping in the treatment of femoral head necrosis[J]. China J Orthop Traumatol, 2021, 34(6): 534-538. Chinese.

[15] PATEL A N, MITTAL S, VINA R F, et al. Long term follow-up of coronary artery bypass grafting with autologous bone marrow cell therapy[J]. Cytotherapy, 2014, 16(4): S39.

[16] HE W, LI Y, ZHANG Q W, et al. Primary outcome of impacting bone graft and fibular autograft or allograft in treating osteonecrosis of femoral head[J]. Chin J Reparative Reconstr Surg, 2009, 23(5): 530-533.

[17] HUANG Z Q, TAN B, YE H L, et al. Dynamic evolution of osseous structure in osteonecrosis of the femoral head and dynamic collapse risks: a preliminary CT image study[J]. J Orthop Surg Res, 2020, 15(1): 539.

[18] 于潼, 谢利民, 张振南, 等. 早期股骨头坏死塌陷风险预测评估体系的临床研究[J]. 中国骨伤, 2021, 34(7): 617-622.
YU T, XIE L M, ZHANG Z N, et al. Clinical study on new risk assessment and prediction system for early osteonecrosis of the femoral head[J]. China J Orthop Traumatol, 2021, 34(7): 617-622. Chinese.

[19] WU Z Y, WANG B Z, TANG J H, et al. Degradation of subchondral bone collagen in the weight-bearing area of femoral head is associated with osteoarthritis and osteonecrosis[J]. J Orthop Surg Res, 2020, 15(1): 526.

[20] ASADA R, ABE H, HAMADA H, et al. Femoral head collapse rate among Japanese patients with pre-collapse osteonecrosis of the femoral head[J]. J Int Med Res, 2021, 49(6): 3000605211023336.
(收稿日期: 2022-06-16 本文编辑: 王玉蔓)

· 综述 ·

股骨颈骨折对局部血供的损伤及评估——解剖基础及其临床运用进展

吴升辉, 缪语, 朱晓中, 李广翼
(上海交通大学医学院附属第六人民医院, 上海 200233)

【摘要】 股骨颈骨折内固定的稳定性可在很大程度上通过手术技巧及内固定排布和植入骨替代物等方法获得, 但当前医疗技术水平尚无法完全逆转骨折产生的血供损伤。因此, 在围手术期, 全面评估股骨颈骨折后局部残余血供以避免医源性损伤成为了目前研究的热点。关于股骨颈骨外层血供的解剖研究相对成熟, 其运用主要涉及旋股内侧动脉和支持带动脉的评估, 但不同损伤程度的预后需要进一步探索。当前, 临床上尚无法直接观察到骨面的滋养孔, 但可根据其分布的密集次序、进行合理的术前规划, 尽可能保护残存血供, 以避免后续股骨头坏死的发生。而骨内血供的解剖基础及临床研究主要聚焦于头颈结合区, 以探究股骨头坏死的机制。但关于股骨颈的其它区域骨内血管分布及交联机制仍需要进一步探究。此外, 后续研究可根据骨外血管走行、滋养孔分布及骨内血管网的特征建立完善的基于多层次结构综合的血供评估体系, 用于辅助股骨颈骨折的治疗。

【关键词】 股骨颈骨折; 解剖; 血管; 滋养孔

中图分类号: R683.42

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.2023.03.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Assessment of the local blood supply when femoral neck fracture occurs: advances in the anatomy research and its clinical application

WU Sheng-hui, MIAO Yu, ZHU Xiao-zhong, LI Guang-yi (Shanghai Sixth People's Hospital Affiliated to Shanghai Jiaotong University School of Medicine, Shanghai 200233, China)

ABSTRACT The stability of internal fixation of femoral neck fractures can be obtained through surgical techniques, the configuration of screws and bone grafting, etc. However, the blood supply injury caused by fractures could not be completely

reversed by the current medical management. Hence, the comprehensive evaluation of the residual blood supply of the femoral neck, to perioperatively avoid further iatrogenic injury, has become a hotspot. The anatomy of the extraosseous blood supply of the femoral neck has been widely reported, while its clinical application mostly involved the assessment of the medial circumflex femoral artery and retinacular arteries. However, further studies are needed to explore the prognosis of patients with these artery injuries, with different degrees, caused by femoral neck fractures. Direct observations of nutrient foramina in vivo are not possible with current clinical technologies, but it is possible to make reasonable preoperative planning to avoid subsequent femoral head necrosis based on the distribution features of nutrient foramina. The anatomy and clinical application studies of the intraosseous blood supply focused on the junction area of the femoral head and neck to probe the mechanism of femoral head necrosis. Thus, the intraosseous blood supply of other regions in the femoral neck remains to be further investigated. In addition, a blood supply evaluation system based on a three-level structure, extraosseous blood vessels, nutrient foramina, and intraosseous vascular network, could be explored to assist in the treatment of femoral neck fractures.

KEYWORDS Femoral neck fracture; Anatomy; Blood vessel; Nutrient foramina

股骨颈骨折是骨科常见的损伤之一,其发生率随着年龄和交通事故的增加而增加,约占髋部骨折的 50%^[1]。股骨颈骨折的发生直接影响患者活动能力,引起临床并发症,最终导致死亡率较高^[2]。随着医疗水平的进步和对骨折理解的提升,股骨颈骨折常见治疗方式有两种:内固定术和关节置换术。高龄、严重骨折移位、伴有骨质疏松患者多采用关节置换术,而大多数年轻患者则采用内固定术^[3]。由于股骨颈和股骨头的解剖和血液供应特点,股骨颈骨折术后并发症发生率相对较高^[4-5]。术后并发症主要包含股骨头坏死、骨不连等。股骨头坏死可能导致关节塌陷,常需要再次行关节置换术。恢复骨折断端的生物修复能力和稳定性是骨不连的常用治疗原则。活性骨移植,如游离腓骨移植等,是可选择的治疗方式,但此术式技术含量高,需要显微外科器械和丰富经验,难以推广运用。因此,股骨颈骨折内固定术后并发症一直是世纪难题,仍是骨科医师治疗过程中面临的巨大挑战。

股骨颈骨折的骨愈合主要由两大因素决定:稳定性和血供。骨折断端的稳定性可通过多种因素获得,包括复位、内固定类型、内固定排布、植骨等^[6-8]。在获得理想稳定性的前提下,骨折端周围血供的维持对骨折愈合尤为重要,否则容易引起股骨颈骨折术后的骨不连。而血供损伤亦是股骨颈骨折内固定术后股骨头坏死的常见原因^[9]。因此,当现有的医疗技术水平尚不足以完全恢复股骨颈骨折导致的血供损伤时,在围手术期明确骨折造成损伤血供程度能够指导医师进行合理治疗,进而改善骨折的预后。

本文旨在就骨外、骨面及骨内 3 层次对股骨颈血供进行总结,为临床评估股骨颈骨折血供提供理论依据,为综合判断股骨颈骨折内固定术后预后疗效提供参考。

1 股骨颈骨外血供

1.1 解剖基础

股骨颈骨外血供研究相对较成熟。股动脉分出

的股深动脉是大腿的主要动脉,为髋关节、股骨及周围肌肉提供血液供应^[10]。旋股内侧动脉和旋股外侧动脉是股深动脉的第一支分支,或直接起源于股总动脉或股浅动脉。其中,供应髋关节的最重要且最主要的血管是旋股内侧动脉。旋股内侧动脉由 3 个不同的部分组成:横段、上段和深部段。横段在髂腰肌和耻骨肌之间向后延伸。血管向后上升,即为上段,朝向转子间嵴,在闭孔外肌和股方肌之间的脂肪组织内运行。在近端,旋股内侧动脉发出侧向的转子分支,而在继续囊内之前,主要动脉向后穿过闭孔外肌腱作为深部段^[11]。

1742 年,Weitbrecht 首次描述沿股骨颈的髋关节内滑膜褶皱,并于 1856 年 Henle 将其命名为支持带,之后支持带一直被称为 Weitbrecht 支持带^[12]。Weitbrecht 的支持带位于股骨颈的上方、下方和前方。上端与髋关节囊相连,下端止于股骨头关节软骨的边缘,是股骨头与颈合并的标志点。旋股外侧动脉和内侧动脉的从属动脉在穿过股骨颈底部的包膜内部时发出分支,这些沿着 Weitbrecht 支持带分布的动脉分支称为支持带动脉,即上、下和前支持带动脉。股骨头的血液供应来自 3 个主要的动脉系统:支持带、圆韧带和骨内,但支持带动脉是股骨头血供的主要血液来源^[12]。由于 Weitbrecht 支持带距离股骨颈较近,股骨颈骨折可能损伤支持带动脉。

1.2 临床运用

既往骨外血供评估主要基于旋股内侧动脉和支持带血管,并借助数字减影血管造影技术进行可视化分析,说明了复位及内固定对股骨颈骨外血管的影响。复位过程中牵引可能损伤股骨颈骨外的血管。XIAO 等^[13]应用数字减影血管造影探讨牵引对股骨颈骨折后股骨头血供的早期影响,通过分析 9 例单侧股骨颈骨折患者的支持带动脉损伤情况,发现牵引会导致支持带动脉血流减少,静脉引流受阻,最终损害股骨头的血液灌注,导致股骨颈骨折后股骨头坏死的风险增加。WU 等^[14]分析股骨颈骨折后髋关节

囊内压力及其与髋关节位置或牵引的关系,并使用数字减影血管造影技术评估股骨头血供以及牵引和髋关节位置对血供的影响。其研究纳入 26 例新鲜 Garden I-III 型股骨颈骨折,分别置于中立位、内旋或牵引 3、5 kg 后,测量囊内测压变化,并分析 8 例在髋关节囊压力变化下旋股内动脉及其分支的血液灌注情况。结果发现牵引和内旋均引起髋关节囊内压力明显升高,导致股骨头灌注减少,并阻碍静脉回流,可能导致股骨头缺血性坏死风险增加。因此,在股骨颈骨折复位过程中,在技术可行的情况下,避免长时间牵引、内旋尤为重要,必要时使用数字减影血管造影技术进行实时评估亦可作为一种预防策略。当复位成功后,合理放置内固定物可避免对股骨颈周围血管的医源性损伤。PUTNAM 等^[15]描述前路遇到的下支持动脉在关节内位置,并定义了股骨颈骨折支撑板固定的安全区域。经股骨总动脉注射造影剂后,经前路(改良 Smith-Petersen)解剖了 15 具新鲜尸体的 30 个髋部,分析旋股内侧动脉起始和至其终点的途径。结果发现下支持带的关节内路径位于股骨颈 7 点和 8 点之间的 Weitzbrecht 韧带内。当股骨颈内固定物位于股骨颈 6 点处时,即于下支持动脉的前方,不会影响血液供应。

目前,青壮年股骨颈骨折多采用内固定治疗,而此类型多由高能量损伤导致,进而导致股骨颈周围血管严重受损,最终增加股骨头缺血性坏死的风险。上支持带动脉作为经过股骨颈最终汇入股骨头的主要血管,明确其损伤程度有助于评估患者的预后。WANG 等^[16]报道了 2015 年至 2018 年 10 例青壮年 Garden III 型股骨颈骨折经切开复位内固定及显微外科探查上支持带血管,观察了青壮年股骨颈骨折后上支持带血管的损伤情况。本研究将损伤类型分为 3 种:A 型:血管完好无损,但被移位的骨折碎片牵拉或压缩,可通过复位恢复血供;B 型:血管撕脱,无法通过复位重建血管;C 型:血管破裂,残余血管存在,可通过血管吻合重建。ZHAO 等^[17]报道 1 例通过显微外科技术修复上支持带血管,成功实现股骨颈骨折后血供重建,并取得较好疗效。然而,目前仍缺乏大样本及长期随访的临床证据说明此术式的疗效。此外,该手术对显微手术技术要求高,难以普及,明确上支持带动脉不同损伤程度的预后将更具可行性。因此,对于股骨颈骨折后支持带血管损伤程度及相关预后仍需要进一步探索。

关于股骨颈骨外面血供的解剖研究相对成熟,旋股内侧动脉和支持带动脉是经过股骨颈最终汇入股骨头的最主要血管。而复位过程中的牵引及内旋动作、股骨颈上内固定物的放置位置均有可能

加重股骨颈骨外血管的损伤,借助数字减影血管造影技术进行实时评估可作为一种预防策略。此外,股骨颈骨折后上支持带可能出现不同程度的损伤,不同损伤程度的预后仍需要进一步探索以指导临床实践。综上所述,股骨颈骨折治疗的术前规划亦应考虑旋股内侧动脉及支持带动脉走行,在技术可行的情况下尽可能保护股骨颈周围残余的血管,以避免并发症的发生。

2 股骨颈骨面血供

2.1 解剖基础

滋养孔作为血管进出骨骼的入口(出口),也是手术中保护股骨头血供的最后一段行程。因此,明确滋养孔的形态学特征及分布规律有助于评估及保护血供,不少学者针对此类话题进行了系列研究。关于股骨颈骨面滋养孔的定量或定性研究结果均和骨外血管分布特征相契合,滋养孔的大小特征亦进一步说明了股骨颈上方滋养孔密集区域是主要的血液灌注通道。

明确滋养孔的分布特征对于确定指导方针和避免髋关节手术期间的医源性损伤至关重要。基于近年研究相对成熟的 3D 地图影射(3D mapping)技术,分析 100 个股骨近端干骨标本滋养孔的三维分布情况,研究发现股骨颈的滋养孔主要分布于头下区,部分集中于基底区,极少数位于经颈区^[18]。MEI 等^[19]分析了 76 个骨干标本中的 2 417 个滋养孔,根据大小、数量和分布进行统计分析,结果发现,在股骨颈的头下、经颈和基底颈区域内,上(外侧)表面的滋养孔数量最多,其次是前、后表面,然后是下(内侧)表面。后续又观察了 100 个成人股骨干骨标本的股骨颈表面,并测定上、下、前支持带动脉滋养孔的直径,结果发现在上、下、前支持带动脉和圆韧带动脉四个主要血管中,上支持带动脉管的滋养孔平均总横截面积最大,圆韧带动脉管的滋养孔的平均总横截面积最小^[20]。然而,对于上支持带动脉管分布区域的滋养孔,直径为 1.0~1.5 mm 和 <0.5 mm 的滋养孔丰富,只有少数圆韧带动脉管的滋养孔直径 >1.5 mm^[20]。KAMATH 等^[21]通过观察 200 个成年干骨标本进行定量研究,40.01% 的滋养孔分布在头下区,31.74% 分布在基底区,28.24% 分布在经颈区,与 3D mapping 定性研究结果相呼应。此外,此研究还发现上支持带分布区域的密度区域最高,占 57.03%,其次是前支持带动脉分布区域(27.3%),而下支持带滋养孔分布占 15.66%。研究还观察到大多数滋养孔直径 <1 mm,其次是直径 1~2 mm 的滋养孔^[21]。

综上所述,研究报道的股骨颈滋养孔总体分布规律及形态学特征一致。股骨颈滋养孔主要分布在

头下区域的上支持带动脉汇集区域,虽然上支持带区域滋养孔的直径相对较小,但平均总横截面积最大,因此,上支持带区域分布的滋养孔是股骨头供应血管出入的主要通道。

2.2 临床运用

目前临床实践中使用的 CT 扫描仪精度尚无法达到观察滋养孔的标准^[18]。因此,既往研究基于人股骨标本探究滋养孔的结构特征及分布规律,而缺乏关于股骨颈骨折导致的滋养孔损伤的临床资料及其相关预后情况等方面的临床研究。当前,虽无法直接观察股骨颈骨折后滋养孔损伤情况,但后续研究可通过股骨颈骨面滋养孔的分布特征及形态学特征在围手术期间接评估损伤情况。

当前医疗技术水平尚无法观察活体的滋养孔,故而明确滋养孔密集区域有助于在临床上判断骨折发生时滋养孔的损伤情况。当骨外的主要血供未受到明显损伤或已受保护时,对关节囊内支持带血管汇集处一滋养孔密集区域的血管保护亦同样重要。由于当前医疗技术短板,滋养孔间接评估的临床运用需要进一步研究。而在临床实践中,可根据滋养孔集中区域的密集次序、进行合理术前规划,尽可能保护残存血供,以避免后续股骨头坏死发生。

3 股骨颈骨内血供

3.1 解剖基础

相比于股骨颈骨外和骨上的血供,由于骨内血管可视化存在挑战,股骨颈骨内血供研究相对较少。传统及改良的 Spalteholz 透明技术通过注入铸造介质塑化血供结构,但由于骨骼坚硬、钙化的结构特殊性,其运用需要骨骼脱钙,可能损伤血管结构,故难以完整展示三维血管分布^[22]。临床上可借助数字减影血管造影技术观察骨内血供,但较小的血管无法显示。ZHANG 等^[23]通过微灌注腐蚀法研究 23 只猪股骨头骨内动脉的三维分布情况,虽然猪是替代人标本进行血供研究的理想模型,但仍需使用标本进行探究人股骨头内动脉的三维分布情况。QIU 等^[24]通过硫酸钡悬浮液灌注并固定股骨头骨内动脉,借助 micro-CT 扫描重建显示股骨头内三维血管分布网。由于可视化技术缺陷,目前仍无法全面、完整地展示骨内血管。因此,后续研究仍需借助成像及染色等新兴技术进一步探究股骨颈骨内三维分布特征。

由于保护血供的最终目的是预防股骨头坏死,因此大多数骨内血管灌注研究关注的是股骨头骨内的血管分布规律。鉴于此,目前股骨颈骨内血管能够进行可视化的区域主要位于股骨颈头颈交界处。研究结果显示,股骨颈头颈区域骨内血管走行与支持带动脉走行的路线相一致^[24]。支持带动脉和圆韧带

动脉进入股骨头后形成分别位于股骨头髓线上、下方的骨髓和干髓端动脉网,而骨髓动脉的主干位于骨内血管系统的外周,靠近中心的结构包含更多的吻合支。此外,与圆韧带动脉和前支持带动脉相比,下支持带动脉的口径比较大。因此,骨髓动脉网和下支持带动脉系统可能是股骨颈骨折后维持股骨头血供的两个重要结构^[25]。总体而言,股骨头与股骨颈交界区域(股骨颈近端区域)的骨内血管分布研究相对成熟,但股骨颈基底及经颈区(股骨颈远端区域)的骨内血管网分布需要进一步研究探索。维持股骨颈近端的血供可能有助于预防股骨头坏死,但股骨颈远端的血供亦需要重视。在维持股骨颈近端骨内血管网的同时,应明确股骨颈远端骨内血管分布情况,尽量减少医源性二次损伤股骨颈远端血管网,维持骨折断端两侧(近端和远端)的骨内血管网完整性,促进骨折断端的快速骨愈合。

3.2 临床运用

目前尚缺乏关于股骨颈骨折后骨内血供评估及其运用的研究报道。股骨颈骨内层面血管主要包含皮质内血管、骨髓血管和骨髓内膜血管等,而血管间的三维相互连接网络机制也尚不清楚。虽然 ARNO-LDI 等^[26-27]报道术中测量骨内压力间接评估不同类型的股骨颈骨折骨内血供情况的方案,但由于技术复杂且有创,此技术难以用于临床。此外,股骨颈骨折后股骨颈区域存在不同程度的缺损,不同缺损对骨内血管的损伤及其相关联的预后仍需进一步说明。而不同内固定占据股骨颈骨内部分空间,其对股骨颈骨内血管网的影响尚不清楚。因此,相比于股骨头骨内血供研究,股骨颈区域的报道较少,不同类型的血管分布及交联机制仍需要进一步研究。在临床运用方面,可根据不同骨折特征评估骨内循环的完整性,并在行内固定手术时,针对股骨颈骨内血管网的分布情况,结合股骨头内血管网分布特征合理设计股骨颈骨折内固定物的排布,促进股骨颈骨折的骨愈合,避免股骨头坏死。

4 总结与展望

当股骨颈骨折发生后,需要对骨折导致的血供损伤进行全面评估,包含骨外血管、骨面的滋养孔、骨内血管网。目前股骨颈骨外血管、骨面滋养孔、股骨颈近端骨内血管网的相关研究相对成熟,而股骨颈基底及经颈区骨内血管网分布特征需要进一步探索。目前,可借助数字减影血管造影技术评估股骨颈骨外旋股内动脉和支持带动脉的损伤情况。股骨颈骨折后上支持带动脉不同损伤程度的预后仍需要进一步探究。由于临床上无法观察滋养孔,故无法对其进行直接评估骨折后损伤程度,但可依据滋养孔

分布特征进行间接评估。关于股骨颈骨内血供主要关注股骨头股骨颈交接区以评估股骨头坏死的风险,但股骨颈其它区域的骨内血管网分布特征、不同骨折特征或不同内固定对骨内血管完整性的影响仍需进一步研究。此外,后续研究可根据血管走行、滋养孔分布及血管网的特征建立完善的基于 3 层次结构综合的血供评估体系,并进一步进行研究探索及验证,用于指导临床、进行血供损伤的综合评估。

参考文献

[1] XU J L, LIANG Z R, XIONG B L, et al. Risk factors associated with osteonecrosis of femoral head after internal fixation of femoral neck fracture: a systematic review and meta-analysis [J]. BMC Musculoskelet Disord, 2019, 20(1): 632.

[2] ZHANG Y Q, YAO Z J, SHI P, et al. Morphological risk factors associated with dislocation after bipolar hemiarthroplasty of the hip in patients with femoral neck fractures—a nested case-control study [J]. J Orthop Surg Res, 2019, 14(1): 395.

[3] 赵勇, 秦伟凯. 重视股骨颈骨折的评估与内固定治疗的若干问题 [J]. 中国骨伤, 2021, 34(3): 195–199.
ZHAO Y, QIN W K. Focus on the evaluation and some questions of internal fixation for femoral neck fracture [J]. China J Orthop Traumatol, 2021, 34(3): 195–199. Chinese.

[4] LI L, ZHAO X, YANG X D, et al. Dynamic hip screws versus cannulated screws for femoral neck fractures: a systematic review and meta-analysis [J]. J Orthop Surg Res, 2020, 15(1): 352.

[5] 陈芒芒, 吕杨训, 林胜磊, 等. 压力侧和张力侧股骨颈皮质粉碎是股骨颈骨折术后无菌性坏死的独立危险因素 [J]. 中国骨伤, 2021, 34(3): 203–208.
CHEN M M, LYU Y X, LIN S L, et al. Pressure side and tension side comminution of femoral neck cortex are independent risk factors for aseptic necrosis after femoral neck fracture surgery [J]. China J Orthop Traumatol, 2021, 34(3): 203–208. Chinese.

[6] LIM E J, KIM B S, KIM C H. Parallel and non-parallel cannulated screw fixation complications in femoral neck fractures: a systematic review and meta-analysis [J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2021, 107(6): 103005.

[7] STEINBERG E L, ALBAGLI A, SNIR N, et al. Addressing posterior tilt displacement during surgery to lower failure risk of sub-capital Garden types 1 and 2 femoral fractures [J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2022, 142(8): 1885–1893.

[8] 朱求亮, 颜茂华, 许斌, 等. 闭合复位技术治疗外展嵌插型股骨颈骨折 [J]. 中国骨伤, 2022, 35(4): 357–360.
ZHU Q L, YAN M H, XU B, et al. Treatment of abduction and insertion femoral neck fracture with closed reduction technique [J]. China J Orthop Traumatol, 2022, 35(4): 357–360. Chinese.

[9] MEI J, WANG S Q, NI M, et al. Association between Weitbrecht’s retinaculum injury and femoral head necrosis in femoral neck fractures [J]. Orthop Surg, 2022, 14(8): 1759–1767.

[10] VUKSANOVIC-BŐZARIC A, ABRAMOVIC M, VUCKOVIC L, et al. Clinical significance of understanding lateral and medial circumflex femoral artery origin variability [J]. Anat Sci Int, 2018, 93(4): 449–455.

[11] LAZARO L E, KLINGER C E, SCULCO P K, et al. The terminal branches of the medial femoral circumflex artery: the arterial supply

of the femoral head [J]. Bone Joint J, 2015, 97B(9): 1204–1213.

[12] DOU B, MEI J, WANG Z Y, et al. Histological observation of the retinacula of weitbrecht and its clinical significance [J]. IJOO, 2018, 52(2): 202–208.

[13] XIAO J, YANG X J, XIAO X S. DSA observation of hemodynamic response of femoral head with femoral neck fracture during traction: a pilot study [J]. J Orthop Trauma, 2012, 26(7): 407–413.

[14] WU K, HUANG J H, WANG Q G. The use of superselective arteriography in the evaluation of the influence of intracapsular hip joint pressure on the blood flow of the femoral head [J]. Med Princ Pract, 2016, 25(2): 123–129.

[15] PUTNAM S M, COLLINGE C A, GARDNER M J, et al. Vascular anatomy of the medial femoral neck and implications for surface plate fixation [J]. J Orthop Trauma, 2019, 33(3): 111–115.

[16] WANG Z H, GU L S, CHENG L L. Open reduction and internal fixation and intraoperative exploration of the superior retinacular arterial system in young adults Garden III femoral neck fracture: a 10 case report [J]. Ann Plast Surg, 2020, 84(5S Suppl 3): S222–S224.

[17] ZHAO D W, WANG Z H, WANG B J, et al. Revascularization of the femoral head by anastomosis of superior retinacular vessels for the treatment of femoral neck fracture: a case report [J]. Microsurgery, 2016, 36(5): 426–429.

[18] WU S H, QUAN K, WANG W, et al. 3D mapping of bone channel of blood supply to femoral head in proximal femur [J]. Front Surg, 2022, 9: 852653.

[19] MEI J, NI M, WANG G L, et al. Number and distribution of nutrient foramina within the femoral neck and their relationship to the retinacula of Weitbrecht: an anatomical study [J]. Anat Sci Int, 2017, 92(1): 91–97.

[20] MEI J, QUAN K, WANG H, et al. Total cross-sectional area of the femoral neck nutrient foramina measured to assess arterial vascular beds in the femoral head [J]. J Orthop Surg Res, 2019, 14(1): 439.

[21] KAMATH V, GUPTA C. Morphological study on distribution of nutrient foramina in femoral neck in relation to retinacula of weitbrecht with its surgical implications [J]. J Orthop, 2022, 31: 57–60.

[22] STEINKE H, WOLFF W. A modified Spalteholz technique with preservation of the histology [J]. Ann Anat, 2001, 183(1): 91–95.

[23] ZHANG X N, DENG W, JU J H, et al. A method to visualize and quantify the intraosseous arteries of the femoral head by vascular corrosion casting [J]. Orthop Surg, 2022, 14(8): 1864–1872.

[24] QIU X, SHI X T, OUYANG J, et al. A method to quantify and visualize femoral head intraosseous arteries by micro-CT [J]. J Anat, 2016, 229(2): 326–333.

[25] ZHAO D W, QIU X, WANG B J, et al. Epiphyseal arterial network and inferior retinacular artery seem critical to femoral head perfusion in adults with femoral neck fractures [J]. Clin Orthop Relat Res, 2017, 475(8): 2011–2023.

[26] ARNOLDI C C, LEMPERG R, LINDERHOLM H. Intraosseous pressures in patients with different types of fracture of the femoral neck [J]. Angiology, 1970, 21(6): 403–412.

[27] ARNOLDI C C, LINDERHOLM H. Fracture of the femoral neck. I. Vascular disturbances in different types of fractures, assessed by measurements of intraosseous pressures [J]. Clin Orthop Relat Res, 1972, 84: 116–127.