

❖ 骨骼肌肉影像学

Measuring lateral center edge angle and Sharp angle of hip joint on X-ray films based on deep learning for diagnosing hip dysplasia

LIN Yijun^{1,2}, YANG Guangyao³, JIANG Yaoxian⁴, CHANG Xiaodan^{1*}

(1. Department of Radiology, Affiliated Zhongshan Hospital of Dalian University, Dalian 116001, China;

2. Department of CT Diagnosis Room, Qiqihar First Hospital, Qiqihar 161000, China; 3. College of Information and Computer Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

4. Department of Radiology, Affiliated Children Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400014, China)

[Abstract] **Objective** To investigate the value of measuring the lateral center edge (LCE) angle and Sharp angle of hip joint on X-ray films based on deep learning for diagnosing hip dysplasia. **Methods** Bilateral-hip anteroposterior digital radiographs of 384 adults were retrospectively analyzed. The key points of the acetabulum and the outline of the femur were labeled by 2 radiologists for model training. Ten-fold cross-validation was used to obtain the prediction results, while LCE angle and Sharp angle of bilateral hip joints were automatically measured with the program. Then LCE angle and Sharp angle on X-ray films were manually measured by the above radiologists for diagnosing hip dysplasia and borderline dysplasia. The manually measured and automatically measured LCE angle and Sharp angle were compared, and the correlations were observed. Intra-class correlation coefficient (ICC) was used to evaluate the consistency of the measurement results. Receiver operating characteristic (ROC) curve was used to evaluate the efficacy of automatic measurement of LCE angle and Sharp angle for diagnosing hip dysplasia. **Results** Totally 768 hip joints were measured. No significant difference of the left and right LCE angle nor right Sharp angle was found between manual measured and automatic measured results (all $P > 0.05$), while the manually measured left Sharp angle was smaller than automatically measured ones ($P < 0.05$). For left and right LCE angle, left and right Sharp angle, the ICC of manual measurement and automatic measurement was 0.944, 0.904, 0.890 and 0.887, and the r value was 0.948, 0.924, 0.910 and 0.887, respectively (all $P < 0.05$). Hip dysplasia was diagnosed in 73 hips, while borderline hip dysplasia was diagnosed in 93 hips. The sensitivity and accuracy of diagnosing hip dysplasia based on automatic measurement was 87.67% (64/73) and 95.57% (734/768), of diagnosing borderline dysplasia was 66.67% (62/93) and 91.54% (703/768), respectively. The area under the curve (AUC) of automatic measurement of LCE angle (threshold value of 25.24°) for diagnosing hip dysplasia was 0.928 ($P < 0.05$), and of Sharp angle (threshold value of 43.47°) was 0.906 ($P < 0.05$). **Conclusion** Automatic measurement of bilateral hip LCE angle and Sharp angle on radiographs based on deep learning could be used to diagnose hip dysplasia.

[Keywords] hip joint; radiography; deep learning

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2022.11.026

[第一作者] 林奕军(1982—),男,黑龙江齐齐哈尔人,在读硕士,副主任医师。研究方向:骨骼肌肉影像学。E-mail: 346162557@qq.com

[通信作者] 常晓丹,大连大学附属中山医院放射科,116001。E-mail: 302647771@qq.com

[收稿日期] 2022-06-01 [修回日期] 2022-08-24

基于深度学习测量 X 线片髋关节外侧中心边缘角和 Sharp 角评估髋关节发育不良

林奕军^{1,2}, 杨光耀³, 蒋耀先⁴, 常晓丹^{1*}

(1. 大连大学附属中山医院放射科, 辽宁 大连 116001; 2. 齐齐哈尔市第一医院 CT 诊断室, 黑龙江 齐齐哈尔 161000; 3. 东北林业大学信息与计算机工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 4. 重庆医科大学附属儿童医院放射科, 重庆 400014)

[摘要] **目的** 探讨基于深度学习测量 X 线片髋关节外侧中心边缘(LCE)角和 Sharp 角评估髋关节发育不良的价值。**方法** 回顾性收集 384 例成人双髋关节正位数字化 X 线片。由 2 名影像科医师标注髋臼关键点和股骨轮廓用于模型训练,经十折交叉验证得到预测结果;以设定程序自动测量双侧髋关节 LCE 角和 Sharp 角,由上述医师于 X 线片中手动测量 LCE 角和 Sharp 角并诊断髋关节发育不良及交界性发育不良。对比手动测量与自动测量 LCE 角、Sharp 角结果的差异;观察手动测量与自动测量的相关性;以组内相关系数(ICC)评估测量结果的一致性;采用受试者工作特征(ROC)曲线评估自动测量 LCE 角、Sharp 角诊断髋关节发育不良的效能。**结果** 共测量 768 侧髋。手动测量与自动测量左侧 LCE 角、右侧 LCE 角、右侧 Sharp 角结果差异无统计学意义(P 均 >0.05),手动测量左侧 Sharp 角小于自动测量结果($P<0.05$)。对左、右侧 LCE 角及左、右侧 Sharp 角,手动测量与自动测量结果的 ICC 分别为 0.944、0.904、0.890 及 0.887, r 值分别为 0.948、0.924、0.910 及 0.887(P 均 <0.05)。共诊断 73 侧髋关节发育不良、93 侧交界性髋关节发育不良。基于自动测量诊断髋关节发育不良的敏感度为 87.67%(64/73),准确率为 95.57%(734/768);诊断交界性发育不良的敏感度为 66.67%(62/93),准确率为 91.54%(703/768)。自动测量 LCE 角(阈值为 25.24°)和 Sharp 角(阈值为 43.47°)诊断髋关节发育不良的曲线下面积(AUC)分别为 0.928 和 0.906(P 均 <0.05)。**结论** 基于深度学习自动测量 X 线片中双侧髋关节 LCE 角和 Sharp 角可诊断髋关节发育不良。

[关键词] 髋关节;放射摄影术;深度学习

[中图分类号] R684; R445.4 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-3289(2022)11-1710-05

髋关节发育不良是中青年髋关节骨性关节炎的主要病因之一^[1]。X 线检查是评估髋关节发育的常用方法^[2-3]。近年来人工智能在影像学领域的应用不断深入^[4-6],如基于 X 线片预测髋部骨折^[7]、检测骨盆骨龄^[8]、评估髋关节脱位^[9]等。本研究观察基于深度学习测量 X 线片髋关节外侧中心边缘(lateral center edge, LCE)角和 Sharp 角评估髋关节发育不良的价值。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性分析 2017 年 1 月—2018 年 1 月 384 例于大连大学附属中山医院接受双髋关节数字化 X 线检查患者(共 768 侧髋关节),男 124 例,女 260 例,年龄 20~72 岁,平均(46.9±12.3)岁。纳入标准:①标准化双髋关节正位 X 线片质量满足研究要求;②成人患者,骨骺已闭合。排除标准:①髋关节及骨盆手术史;②髋关节脱位或骨折;③股骨头坏死或髋关节骨关节炎(Kellgren-Lawrence 分级 >2);④其他病变致髋关节结构改变。

1.2 仪器与方法 嘱患者仰卧于 Siemens DR Ysio 或 Shimadzu DR R-20 检查床,伸直双下肢,双足内旋

10°~15°;摄双髋关节正位片,焦片距 100 cm,管电压 70~100 kV,管电流 160~200 mA,以双侧髂前上棘连线中点与耻骨联合上缘连线中点的垂直线为中心线,照射野上界包括髂前上棘、下界包括小转子。

1.3 图像分析 分别由具有 2 年和 15 年工作经验的影像科住院医师和副主任医师阅片。

1.3.1 勾画及标注 采用 ITK-SNAP(www.itksnap.org)软件标注双髋关节正位片中的股骨近端轮廓和髋臼关键点(图 1)。以 NiFTI 格式保存标注后图像,用于神经网络模型训练。

1.3.2 建立模型并自动测量角度 将 384 例数据随机划分为 10 份,随机选取 1 份作为测试集(十折交叉验证)、1 份作为验证集,以其余 8 份作为训练集。对训练集进行数据增强,包括图像水平翻转、旋转、明暗度变化及随机裁剪。进行图像预处理:①对高度 $<2\,560$ 像素的图像行全 0 填充至 2 560 像素,将 $>2\,560$ 像素者裁剪至 2 560 像素;对宽度进行与高度相同操作,但阈值设置为 3 072 像素;②将统一为 2 560×3 072 的图像缩小至 640×768。

采用 Dense-U-net 分割股骨轮廓和髋臼关键点。向



图1 勾画及标注示意图 A~C. 勾画双侧股骨近端轮廓(紫线);标注髋臼关键点,即双侧髋臼外上缘(红点)、泪滴下缘(绿点)

PyCharm 深度学习平台中输入代码,完成网络模型训练,编程序为 Python3.5;使用 Keras 搭建神经网络框架;通过 10 次训练和测试获得网络模型对股骨近端轮廓、髋臼外上缘点和泪滴下缘点的预测结果。按照文献[10]方法确定双侧股骨轮廓上的股骨头中心坐标,结合 4 个髋臼关键点坐标自动构建 LCE 角、Sharp 角并计算其数值。

1.3.3 医师手动测量角度和评估髋关节发育 由上述 2 名医师在图像存储及传输系统(picture archiving and communication system, PACS)测量 LCE 角、Sharp 角(图 2),取其平均值作为最终测值;间隔 1 个月,由副主任医师随机选取 140 侧髋关节进行重复测量。诊断髋关节发育不良标准^[11]:以 LCE 角 $<20^\circ$ 为髋关节发育不良、 $20^\circ\sim 25^\circ$ 为交界性发育不良、 $>25^\circ$ 为髋关节发育正常;Sharp 角 $>45^\circ$ 为髋关节发育不良、 $\leq 45^\circ$ 为其他。首先根据 Sharp 角测量值将髋关节分为发育不良和其他,再根据 LCE 角测量值将后者分为发育不良、交界性发育不良和正常。

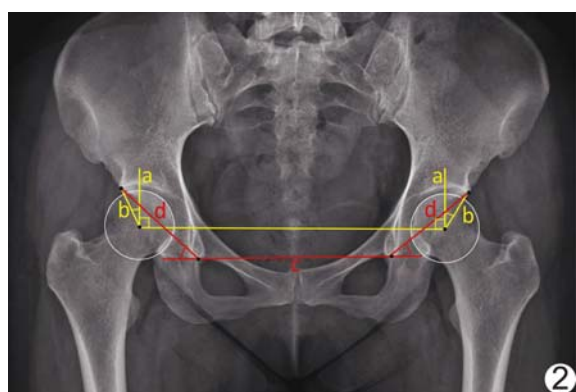


图2 人工测量 LCE 角、Sharp 角示意图 a 线垂直于双侧股骨头中心连线,b 线连接股骨头中心与髋臼外上缘,a 与 b 之间的锐角为 LCE 角;c 线通过双侧泪滴下缘,d 线连接泪滴下缘与髋臼外上缘,c 与 d 之间的锐角为 Sharp 角

1.4 统计学分析 采用 SPSS 23.0 统计分析软件。以中位数(上下四分位数)表示自动测量结果与手动测

量的 LCE 角、Sharp 角,行秩和检验,计算均方根误差(root mean square error, RMSE)和平均绝对误差(mean absolute error, MAE)。采用 Pearson 相关性分析观察自动测量与手动测量结果的相关性;以组内相关系数(intra-class correlation coefficient, ICC)评估测量结果的一致性,ICC ≥ 0.75 为一致性较好。以医师手动测量的 LCE 角、Sharp 角作为诊断髋关节发育不良/交界性发育不良的标准,采用受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线下面积(area under the curve, AUC)评估自动测量 LCE 角、Sharp 角的诊断价值。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 角度比较 针对 768 侧髋,观察者间(ICC 为 0.886~0.936)和观察者内(ICC 为 0.911~0.961)测量结果的一致性均较好。手动测量与自动测量的左、右侧 LCE 角及右侧 Sharp 角差异均无统计学意义(P 均 >0.05),而手动测量的左侧 Sharp 角小于自动测量($P<0.05$),见表 1。对于左、右侧 LCE 角及左、右侧 Sharp 角,手动测量与自动测量的 ICC 分别为 0.944 [95% CI (0.932, 0.954)]、0.904 [95% CI (0.884, 0.920)]、0.890 [95% CI (0.812, 0.929)]、0.887 [95% CI (0.863, 0.906)],相应 r 值分别为 0.948、0.924、0.910、0.887 (P 均 <0.05),见图 3;其中位 RMSE 分别为 2.31° 、 3.33° 、 1.72° 、 1.63° ,中位 MAE 分别为 1.57° 、 1.73° 、 1.19° 、 1.18° 。

2.2 评估髋关节发育 768 侧髋中,医师诊断 73 侧(左侧 33、右侧 40)髋关节发育不良、93 侧(左侧 43、右侧 50)交界性髋关节发育不良,其余髋关节未见明显异常。基于自动测量诊断髋关节发育不良 89 侧,其中 64 侧与医师诊断一致,诊断敏感度 87.67% (64/73),特异度 96.40% (670/695),准确率 95.57% (734/768);诊断交界性发育不良 96 侧,其中 62 侧与医师诊断一致,诊断敏感度 66.67% (62/93),特异度 94.96% (641/675),准确率 91.54% (703/768)。

表 1 手动与自动测量双侧髋关节 LCE 角、Sharp 角结果比较(°, n=768)

方法	左侧 LCE 角	右侧 LCE 角	左侧 Sharp 角	右侧 Sharp 角
手动测量	30.93(26.46, 34.35)	29.48(25.50, 33.84)	39.40(37.15, 41.43)	39.65(37.45, 42.00)
自动测量	30.68(26.31, 34.95)	29.59(24.98, 34.50)	40.18(37.59, 42.57)	39.57(37.45, 42.14)
Z 值	-1.375	-0.350	-9.939	-0.494
P 值	0.169	0.726	<0.001	0.621

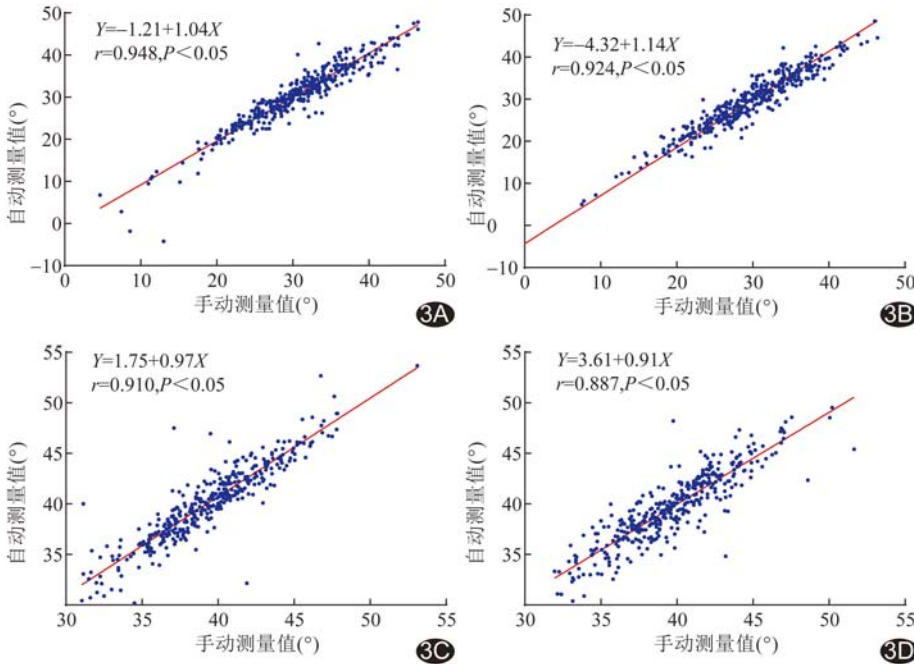


图 3 手动与自动测量髋关节 LCE 角、Sharp 角结果的相关性散点图 A. 左侧 LCE 角; B. 右侧 LCE 角; C. 左侧 Sharp 角; D. 右侧 Sharp 角

ROC 曲线结果显示,自动测量 LCE 角(阈值为 25.24°)和 Sharp 角(阈值为 43.47°)诊断髋关节发育不良的 AUC 分别为 0.928 和 0.906(P 均 <0.05),见图 4。

3 讨论

髋关节发育不良可诱发髋关节骨性关节炎等疾病,但多数患者可因无明显症状而造成诊治延误^[12],故影像学筛查非常必要。LCE 角和 Sharp 角是影像学观察髋关节发育情况的主要参数^[13]。既往主要由医师手动测量 LCE 角和 Sharp 角,存在观察者间差异,且定位股骨头中心步骤复杂,可能影响测量准确性及可重复性;而基于人工智能进行自动测量可弥补上述不足。本研究基于深度学习自动测量成人髋关节 LCE 角和 Sharp 角,观察其用于评估髋关节发育不良的价值。

LCE 角代表股骨头外侧髋臼的覆盖程度。AL-BASHIR 等^[14]采用传统机器学习自动测量 16 幅 X 线片所示双侧髋关节 LCE 角,发现左、右侧 LCE 角的中

位 MAE 分别为 4.53°和 3.64°。本研究结果显示,左、右侧髋关节 LCE 角的中位 MAE 分别为 1.57°、1.73°,误差相对更低;且医师手动测量与自动测量结果的一致性较好,与既往研究^[15]结果相近。髋臼边缘可能影响髋关节角度测量值。将骨赘纳入髋臼边缘可使 LCE 角增加^[16]。本研究参照文献^[16-17]方法,尽量辨别骨赘,并将排除骨赘后的髋臼外端作为标注点;如不能明确区分骨赘,则以髋臼的负重硬化区外端作为标注点,以保证测量结果的准确性。

SAHIN 等^[18]开发了一种计算机辅助程序用于测量 Sharp 角,但仅能定位闭孔中心,用以替代泪滴下缘构建 Sharp 角。LI

等^[19]通过自动定位泪滴下缘和髋臼外上缘点而构建并测量的 Sharp 角与医师手动测量结果无显著差异。本研究结果显示,手动测量与自动测量的右侧 Sharp 角差异无统计学意义,但手动测量的左侧 Sharp 角小于自动测量,左、右侧 RMSE 分别为 1.72°、1.63°,MAE 为 1.19°、1.18°,ICC 为 0.890、0.887,即误差较小且一致性较好,表明自动测量结果接近手动测量值。

交界性髋关节发育不良存在一定特征,如股骨头髋臼覆盖减少、髋臼外侧倾角增大等^[20]。本研究首先基于 Sharp 角 $>45^\circ$ 确定髋关节发育不良,再根据 LCE 角判断其为发育不良或交界性发育不良。基于自动测量诊断髋关节发育不良的准确率为 95.57%,诊断交界性发育不良的准确率 91.54%,表明自动测量用于诊断髋关节发育不良及交界性发育不良具有较高效能。

本研究的主要局限性:①样本量相对不足,故未能采用传统数据集划分方式,而选择十折交叉验证方法;②为单中心研究,有待多中心研究结果加以验证;③回

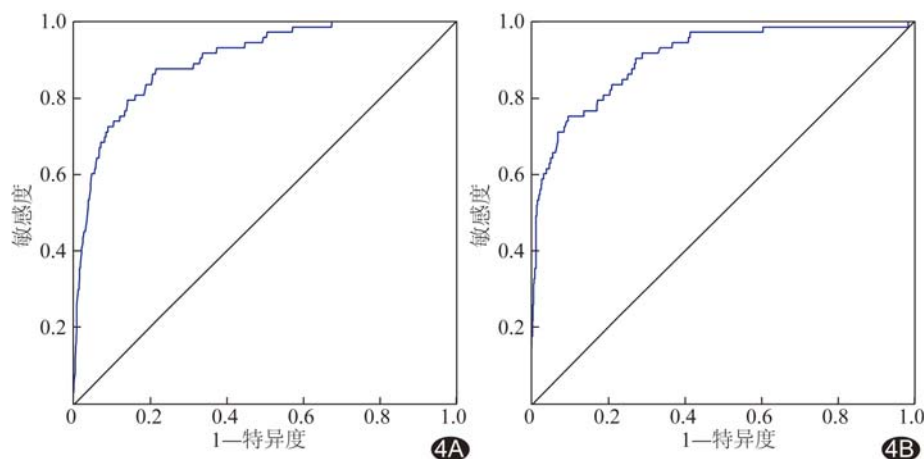


图 4 基于自动测量髋关节 LCE 角、Sharp 角诊断髋关节发育不良的 ROC 曲线 A. LCE 角；
B. Sharp 角

顾性分析,未涉及症状、体征等临床资料,仅以影像科医师意见为诊断髋关节发育不良标准,可能影响结果的准确性。

综上所述,基于深度学习自动测量 X 线片所示双侧髋关节 LCE 角和 Sharp 角可用于诊断髋关节发育不良。

[参考文献]

- [1] LEUNIG M, GANZ R. The evolution and concepts of joint-preserving surgery of the hip[J]. Bone Joint J, 2014, 96-B(1): 5-18.
- [2] WELTON K L, JESSE M K, KRAEUTLER M J, et al. The anteroposterior pelvic radiograph: Acetabular and femoral measurements and relation to hip pathologies[J]. J Bone Joint Surg Am, 2018, 100(1): 76-85.
- [3] 李丹, 谭利华. 成人髋臼发育不良影像学研究进展[J]. 中国医学影像技术, 2018, 34(10): 1585-1589.
- [4] SHI Z, MIAO C, SCHOEPP U J, et al. A clinically applicable deep-learning model for detecting intracranial aneurysm in computed tomography angiography images[J]. Nat Commun, 2020, 11(1): 6090.
- [5] HWANG E J, LEE J S, LEE J H, et al. Deep learning for detection of pulmonary metastasis on chest radiographs[J]. Radiology, 2021, 301(2): 455-463.
- [6] 王岩, 霍爱华, 王大为, 等. 基于深度学习人工智能骨龄测评系统临床应用[J]. 中国医学影像技术, 2021, 37(1): 104-107.
- [7] BADGELEY M A, ZECH J R, OAKDEN-RAYNER L, et al. Deep learning predicts hip fracture using confounding patient and healthcare variables[J]. NPJ Digit Med, 2019, 2: 31.
- [8] LI Y, HUANG Z, DONG X, et al. Forensic age estimation for pelvic X-ray images using deep learning[J]. Eur Radiol, 2019, 29(5): 2322-2329.
- [9] ZHANG S C, SUN J, LIU C B, et al. Clinical application of artificial intelligence-assisted diagnosis using anteroposterior pelvic radiographs in children with developmental dysplasia of the hip[J]. Bone Joint J, 2020, 102-B(11): 1574-1581.
- [10] YANG G, JIANG Y, LIU T, et al. A semi-automatic diagnosis of hip dysplasia on X-ray films[J]. Front Mol Biosci, 2020, 7: 613878.
- [11] BELTRAN L S, ROSENBERG Z S, MAYO J D, et al. Imaging evaluation of developmental hip dysplasia in the young adult[J]. AJR Am J Roentgenol, 2013, 200(5): 1077-1088.
- [12] HARTOFILAKIDIS G, KARACHALIOS T, STAMOS K G. Epidemiology, demographics, and natural history of congenital hip disease in adults[J]. Orthopedics, 2000, 23(8): 823-827.
- [13] LEIDE R, BOHMAN A, WENGER D, et al. Hip dysplasia is not uncommon but frequently overlooked: A cross-sectional study based on radiographic examination of 1 870 adults[J]. Acta Orthop, 2021, 92(5): 575-580.
- [14] AL-BASHIR A K, AL-ABED M, ABU SHARKH F M, et al. Algorithm for automatic angles measurement and screening for developmental dysplasia of the hip (DDH)[J]. Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc, 2015, 2015: 6386-6389.
- [15] YANG W, YE Q, MING S, et al. Feasibility of automatic measurements of hip joints based on pelvic radiography and a deep learning algorithm[J]. Eur J Radiol, 2020, 132: 109303.
- [16] LEE Y K, CHUNG C Y, KOO K H, et al. Measuring acetabular dysplasia in plain radiographs[J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2011, 131(9): 1219-1226.
- [17] CHUNG C Y, PARK M S, LEE K M, et al. Hip osteoarthritis and risk factors in elderly Korean population[J]. Osteoarthritis Cartilage, 2010, 18(3): 312-316.
- [18] SAHIN S, AKATA E, SAHIN O, et al. A novel computer-based method for measuring the acetabular angle on hip radiographs[J]. Acta Orthop Traumatol Turc, 2017, 51(2): 155-159.
- [19] LI Q, ZHONG L, HUANG H, et al. Auxiliary diagnosis of developmental dysplasia of the hip by automated detection of Sharp's angle on standardized anteroposterior pelvic radiographs[J]. Medicine (Baltimore), 2019, 98(52): e18500.
- [20] MCCLINCY M P, WYLIE J D, YEN Y M, et al. Mild or borderline hip dysplasia: Are we characterizing hips with a lateral center-edge angle between 18° and 25° appropriately?[J]. Am J Sports Med, 2019, 47(1): 112-122.