

Deep learning image reconstruction algorithm in low-dose coronary CT angiography of obese persons

WANG Hongwei¹, LI Ying¹, GAO Yifeng¹, WANG Rui¹,
DU Zhiqiang¹, YU Min², XU Lei^{1*}

(1. Department of Medical Imaging, Beijing Anzhen Hospital, Capital Medical University, Beijing 100029, China;

2. Department of CT Product, General Electric Technology Park, Beijing 102600, China)

[Abstract] **Objective** To explore the feasibility of applying deep learning image reconstruction (DLIR) algorithm in low-dose coronary CT angiography (CCTA) examination of obese persons. **Methods** A total of 30 patients with suspected coronary artery disease (CAD) (body mass index [BMI] ≥ 28 kg/m²) were included. CCTA scanning were performed with 100 kV tube voltage. Then the images were reconstructed using DLIR (DLIR-M group and DLIR-H group) and compared with those using adaptive iterative statistical reconstruction Veo (ASIR-V group). CT value, noise and contrast to noise ratio (CNR) of left atrium (LA), aortic root (Ao), the para-aortic root anterior mediastinal fat (FAT) and proximal coronary arteries were recorded. The image quality of CCTA under three reconstruction methods was evaluated and compared using 5-Likert scoring. **Results** No statistically significant difference of CT values of Ao was found among 3 groups ($P > 0.05$). Image noise of DLIR-M group and DLIR-H group were lower and CNR were higher than those of ASIR-V group, and significant statistical differences of noise and CNR were found between DLIR-H group and ASIR-V group (both $P < 0.05$), but not between DLIR-M group and ASIR-V group (both $P > 0.05$). The subjective image quality evaluation of DLIR-M group and DLIR-H group were significantly higher than that of ASIR-V group (both $P < 0.05$), and the highest subjective image quality score was found in DLIR-H group. The effective radiation dose of all 30 patients was (1.12 ± 0.28) mSv. **Conclusion** DLIR algorithm could significantly reduce image noise and improve image quality in CCTA of obese persons.

[Keywords] obesity; tomography, X-ray computer; angiography; deep learning; image quality

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2021.05.029

深度学习图像重建算法用于肥胖个体低剂量冠状动脉 CT 血管成像

王宏伟¹, 李 瑛¹, 高一峰¹, 王 瑞¹, 杜志强¹, 于 敏², 徐 磊^{1*}

(1. 首都医科大学附属北京安贞医院医学影像科, 北京 100029;

2. 通用电气电子科技园 CT 产品部, 北京 102600)

[摘要] **目的** 观察深度学习图像重建(DLIR)算法用于肥胖个体低剂量冠状动脉 CT 血管成像(CCTA)的可行性。**方法** 纳入 30 例体质量指数(BMI) ≥ 28 kg/m² 的疑似冠状动脉疾病(CAD)患者, 以管电压 100 kV 行 CCTA 扫描; 采用 DLIR(DLIR-M 组及 DLIR-H 组)算法重建图像, 并与自适应统计迭代重建(ASIR-V 组)图像相比较; 测量左心房(LA)、主

[基金项目] 国家自然科学基金联合基金项目(U1908211)。

[第一作者] 王宏伟(1995—), 女, 山东青岛人, 在读硕士, 医师。研究方向: 心血管影像学。E-mail: whw2018@ccmu.edu.cn

[通信作者] 徐磊, 首都医科大学附属北京安贞医院医学影像科, 100029。E-mail: leixu2001@hotmail.com

[收稿日期] 2020-10-03 **[修回日期]** 2021-03-15

动脉根部(Ao)、主动脉根部旁前纵隔脂肪(FAT)及各冠状动脉近端 CT 值、噪声及对比噪声比(CNR),以 5-Likert 评分比较 3 种重建图像质量。结果 3 组图像中,Ao CT 值差异无统计学意义($P>0.05$)。DLIR-M 组、DLIR-H 组图像噪声低于 ASIR-V 组,CNR 高于 ASIR-V 组,其中 DLIR-H 组与 ASIR-V 组差异均有统计学意义(P 均 <0.05),DLIR-M 组与 ASIR-V 组差异均无统计学意义(P 均 >0.05)。DLIR-M 组及 DLIR-H 组主观图像质量评价均明显高于 ASIR-V 组(P 均 <0.05),DLIR-H 组主观图像评分最高。30 例有效辐射剂量(1.12 ± 0.28)mSv。结论 DLIR 算法可显著降低肥胖个体 CCTA 图像噪声,提高图像质量。

[关键词] 肥胖; 体层摄影术,X 线计算机; 血管造影术; 深度学习; 图像质量

[中图分类号] R541.4; R814.42 [文献标识码] A [文章编号] 1003-3289(2021)05-0754-05

超重及肥胖是冠状动脉疾病(coronary artery disease, CAD)的重要危险因素^[1]。冠状动脉 CT 血管成像(coronary CT angiography, CCTA)具有较高敏感度及阴性预测值,是无创检查 CAD 的主要方式之一^[2],但受检者脂肪组织较多可增加图像噪声,影响 CCTA 图像质量及诊断准确率,为此多通过增加管电压等方法改善图像质量,导致辐射剂量增加^[3],且目前常用的迭代重建技术无法解耦图像质量与辐射剂量^[4],在肥胖人群中应用受限。随着人工智能的迅速发展,基于深度学习(deep learning, DL)的重建方式已被证实可提高 CCTA 图像质量^[5]。本研究对比深度学习图像重建(DL image reconstruction, DLIR)与自适应统计迭代重建(adaptive statistical iterative reconstruction Veo, ASIR-V)算法对肥胖人群低剂量 CCTA 图像质量的影响。

1 资料与方法

1.1 研究对象 前瞻性纳入 2019 年 8 月—2019 年 10 月体质量指数(body mass index, BMI) ≥ 28 kg/m²^[6]的 30 例临床疑诊 CAD 患者,男 21 例,女 9 例,年龄 32~80 岁,平均(54.7 ± 11.0)岁;BMI $28.07\sim39.04$ kg/m²,平均(32.63 ± 3.23)kg/m²。排除标准:①对比剂过敏;②合并心或肾功能不全;③冠状动脉手术史。本研究获得院伦理委员会批准(伦理编号:2017048X)。检查前所有患者均签署知情同意书。

1.2 仪器与方法 扫描前未使用控制心率药物。采用 GE 256 排 Revolution CT 机,嘱患者仰卧于扫描床,以双筒高压注射器经前臂静脉留置针以 4~5 ml/s 流率注射碘海醇注射液 50~60 ml(350 mgI/ml)及 30~35 ml 生理盐水,之后采用前瞻性心电门控扫描气管隆嵴下 1~2 cm 至心脏膈面,参数:管电压 100 kV,管电流采用 Smart-mA 技术,准直 256 $\times$ 0.625 mm,机架旋转时间 280 ms,扫描范围 14~16 cm,矩阵 512 $\times$ 512 像素,重建层厚 0.625 mm,层间距 0。采用 DLIR 中级别降噪(DLIR-M)、DLIR 高级别降噪(DLIR-H)及 ASIR-V 50%(ASIR-V)算法重建冠状动脉运动伪影最少的相同采集期相,分别以所获图像为 DLIR-M

组、DLIR-H 组和 ASIR-V 组。

1.3 图像评价 将数据传输至 AW4.7 工作站,由 1 名具有 3 年以上工作经验的影像科医师尽量避开动脉管壁或其他干扰结构于左心房(left atrium, LA)、主动脉根部(aortic root, Ao)、右冠状动脉(right coronary artery, RCA)、左主干动脉(left main artery, LMA)、左前降支动脉(left anterior descending artery, LAD)、左回旋支动脉(left circumflex artery, LCX)近端及主动脉根部旁前纵隔脂肪(the para-aortic anterior mediastinal fat, FAT)各勾画 1 个 ROI,调整 ROI 后获得 3 组重建图像中相同位置的最大测量区域,测量其 CT 值及标准差(standard deviation, SD)。噪声定义为 LA、Ao 及 FAT ROI 的 SD。以 Ao 图像噪声及脂肪密度计算各冠状动脉开口的对比噪声比(contrast to noise ratio, CNR)^[4]。见图 1。

由另 2 名具有 5 年以上工作经验的影像科医师针对重建图像以 5-Likert 评分法^[7]评估冠状动脉 18 节段^[8]图像质量,意见不一致时协商达成一致:图像质量优秀、无伪影、噪声小为 5 分;图像质量好、有轻微伪影和噪声但模糊程度可忽略不计为 4 分;图像质量中等、部分存在伪影及噪声但不影响诊断为 3 分;图像质量较差、伪影严重、有明显噪声为 2 分;图像质量极差、不可评价、噪声很大为 1 分;3~5 分为可评估冠状动脉节段,见图 2。

1.4 辐射剂量 记录 CT 扫描仪自动提供的 CCTA 扫描剂量长度乘积(dosage length product, DLP)及容积 CT 剂量指数(volume CT dose index, CTDIvol),并以胸部转换因子 $k[0.014$ mSv/(mGy $\cdot$ cm)]^[9]计算有效辐射剂量(effective dose, ED)。

1.5 统计学分析 采用 SPSS 23.0 统计分析软件。以 $\bar{x}\pm s$ 表示计量资料,采用单因素方差分析或秩和检验比较各参数组间差异。以 Kappa 检验评价观察者间一致性,Kappa <0.4 为一致性差; $0.4\leq Kappa\leq 0.6$ 为一致性中等; $0.6< Kappa\leq 0.8$ 为一致性较好; $Kappa>0.8$ 为一致性好。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

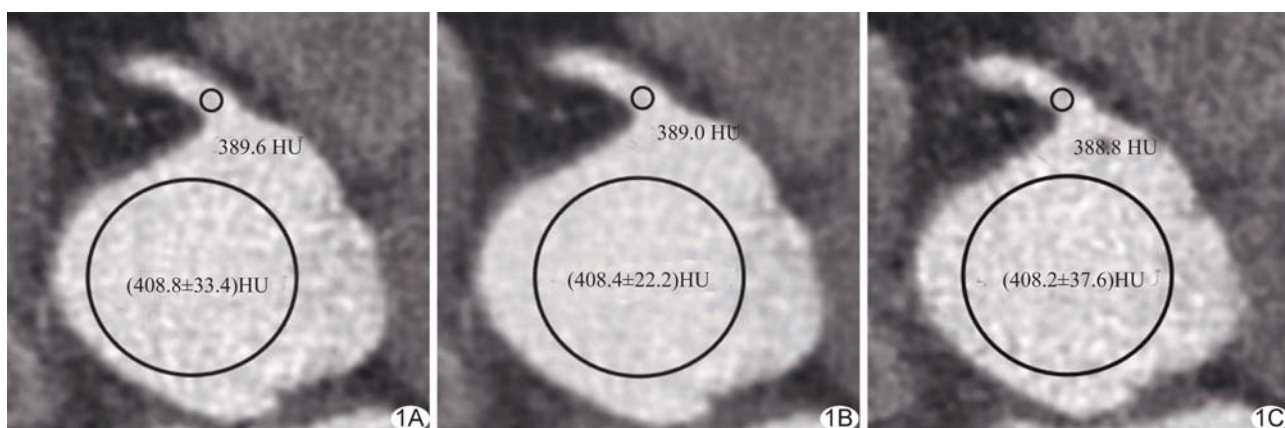


图 1 患者女, 42 岁, BMI=28.31 kg/m² 采用 DLIR-M(A)、DLIR-H(B) 及 ASIR-V(C) 算法重建 CCTA 显示主动脉根部的轴位图像, 勾画主动脉根部(大圆圈)、RCA 近端(小圆圈), 并测量 CT 值



图 2 患者男, 48 岁, BMI=29.39 kg/m² 采用 DLIR-M(A)、DLIR-H(B) 及 ASIR-V(C) 算法重建的 RCA 图像

2 结果

2.1 图像评价 DLIR-M 组、DLIR-H 组及 ASIR-V 组 Ao CT 值分别为 (375.02 ± 50.77) HU、 (375.27 ± 50.71) HU 及 (374.94 ± 50.48) HU, 差异无统计学意义 ($F=0.009$, $P=0.995$)。DLIR-M 组及 DLIR-H 组噪声均低于 ASIR-V 组, ASIR-V 组与 DLIR-H 组差异有统计学意义 ($P<0.05$), 与 DLIR-M 组差异无统计学意义 ($P>0.05$); DLIR-H 组噪声明显低于 DLIR-M 组 ($P<0.05$), 见表 1。DLIR-M 组及 DLIR-H 组 CNR 均高于 ASIR-V 组, ASIR-V 组与 DLIR-H 组差异有统计学意义 ($P<0.05$), 与 DLIR-M 组差异无统计学意义 ($P>0.05$); DLIR-H 组 CNR 明显高于 DLIR-M 组 (P 均 <0.05), 见表 2。

共 329 个冠状动脉节段可评价, ASIR-V 组 302 个 (302/329, 91.79%), DLIR-M 组及 DLIR-H 组各 323 个 (323/329, 98.18%), 见表 3。DLIR-M 组、DLIR-H 组及 ASIR-V 组平均质量评分分别为

(3.81 ± 0.62) 分、 (4.02 ± 0.71) 分及 (3.45 ± 0.66) 分, DLIR-M 组及 DLIR-H 组平均质量评分均明显高于 ASIR-V 组 (P 均 <0.05), DLIR-H 组明显高于 DLIR-M 组 ($P<0.05$)。2 名医师评价图像质量的一致性较高 ($Kappa=0.68$, $P<0.05$)。

表 1 30 例肥胖患者低剂量 CCTA 噪声比较
($\bar{x} \pm s$, $n=30$)

组别	LA	Ao	FAT
DLIR-M 组	38.51 ± 5.15	34.59 ± 6.56	29.87 ± 6.54
DLIR-H 组	$28.45 \pm 4.90^*$	$24.12 \pm 5.48^*$	$22.57 \pm 5.79^*$
ASIR-V 组	$39.21 \pm 4.34^\#$	$37.98 \pm 4.17^\#$	$33.53 \pm 5.80^\#$
F 值	45.262	48.994	36.060
P 值	<0.001	<0.001	<0.001

注: * : 与 DLIR-M 组比较 $P<0.05$; # : 与 DLIR-H 组比较 $P<0.05$

2.2 辐射剂量 30 例 DLP 为 66.79~137.52 mGy·cm, 平均 (79.98 ± 20.19) mGy·cm; CTDIvol 为 4.77~8.81 mGy, 平均 (5.64 ± 1.25) mGy; ED 为 0.94~1.93 mSv, 平均 (1.12 ± 0.28) mSv。

表 2 30 例肥胖患者低剂量 CCTA CNR 比较 ($\bar{x} \pm s, n=30$)

组别	Ao	RCA	LMA	LAD	LCX
DLIR-M 组	16.72±4.45	15.96±4.29	16.08±4.37	16.32±4.16	16.14±4.52
DLIR-H 组	22.31±6.08*	21.23±5.84*	21.48±6.01*	21.71±5.78*	21.32±6.06*
ASIR-V 组	14.65±3.35#	13.74±3.20#	13.89±3.37#	13.94±3.17#	13.60±3.43#
F 值	28.528	29.322	29.647	30.980	25.432
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注: * : 与 DLIR-M 组比较 $P<0.05$; # : 与 DLIR-H 组比较 $P<0.05$

表 3 30 例肥胖患者低剂量 CCTA 主观图像质量评价 (个, $n=329$)

组别	1 分	2 分	3 分	4 分	5 分
DLIR-M 组	1	5	79	214	30
DLIR-H 组	1	5	58	187	78
ASIR-V 组	1	26	127	174	1

3 讨论

DL 是以多层神经网络为特征的端到端机器学习方法,已广泛用于医学图像处理^[10]。本研究采用的 DLIR 是以高剂量滤波反投影 (filtered back projection, FBP) 图像为金标准进行训练,将低剂量图像与相同数据高剂量 FBP 图像的图像噪声、低对比度分辨率、低对比度可检测性及噪声纹理等多个参数进行比较,输出图像并将差异反馈于深度神经网络 (deep neural network, DNN) 供其修改,并多次重复该过程,直至输出图像与相同数据高剂量图像达到精确匹配。随着 BMI 增加, CCTA 不可评估的冠状动脉节段增加,导致诊断准确率下降^[11]。BENZ 等^[5]对比 ASIR-V 70% 标准重建图像与高清内核、DLIR-M、DLIR-H 重建图像,发现 DLIR-M 和 DLIR-H 图像质量高于 ASIR-V 标准和高清内核图像。本研究对 DLIR-M、DLIR-H 与 ASIR-V 50% 图像进行比较,结果显示虽因患者肥胖导致图像噪声增加, DLIR-M 及 DLIR-H 组图像噪声仍低于 ASIR-V 组, CNR 亦高于 ASIR-V 组,提示图像质量较之明显提高; DLIR 算法重建图像中,仅 1.82% (6/329) 冠状动脉节段不可评估,低于 ASIR-V 图像,提示 DLIR 算法具有良好降噪能力。

既往研究^[12]采用噪声功率谱、基于任务的传递函数 50% 及检测能力指数评估 DLIR 图像的噪声纹理、空间分辨率及检测病变能力,发现随重建级别升高, DLIR 降噪能力增加、空间分辨率提高,且检测细微病变能力较高。本研究 DLIR-H 组噪声明显低于、CNR 明显高于 DLIR-M 组,随着 DLIR 级别升高,其降噪能力也得到提升。

国际心血管 CT 协会推荐对肥胖人群行 CCTA 检查时使用更高管电压 (如 120 kV)^[3],而这意味着辐射剂量升高,增加潜在致癌风险。将管电压从 120 kV

降至 100 kV 降低 30% 左右辐射剂量,但会增加噪声,导致图像质量下降,采用更有效的图像降噪处理方法是低管电压 CCTA 的可靠保证。一项针对肥胖患者图像重建算法的研究^[4]发现其平均 ED 为 (4.41 ± 0.83) mSv。本研究 30 例平均 ED 为 (1.12 ± 0.28) mSv,辐射剂量明显降低。

本研究的局限性:①样本量小,各组图像因算法不同而存在差异,可能导致偏倚;②仅以评价重建图像诊断 CAD 的准确率,而未与冠状动脉造影进行对比;③未与管电压 120 kV 的图像进行对比。

总之,采用 DLIR 算法、可显著降低肥胖人群 CCTA 图像噪声、提高图像质量,增加可评估冠状动脉节段数量,且高级别降噪可进一步提高图像质量。

[参考文献]

- [1] MANDVIWALA T, KHALID U, DESWAL A. Obesity and cardiovascular disease: A risk factor or a risk marker? [J]. Curr Atheroscler Rep, 2016, 18(5):21.
- [2] 李浚利, 黄益龙, 韩丹, 等. 冠状动脉 CT 血管成像中人工智能诊断冠心病的准确性 [J]. 中国医学影像技术, 2021, 37(1):59-62.
- [3] HALLIBUTON S S, ABBARA S, CHEN M Y, et al. SCCT guidelines on radiation dose and dose-optimization strategies in cardiovascular CT [J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2011, 5(4):198-224.
- [4] WANG R, SCHOEPPF U J, WU R, et al. Image quality and radiation dose of low dose coronary CT angiography in obese patients: Sinogram affirmed iterative reconstruction versus filtered back projection [J]. Eur J Radiol, 2012, 81(11):3141-3145.
- [5] BENZ D C, BEBETOS G, RAMPIDIS G, et al. Validation of deep-learning image reconstruction for coronary computed tomography angiography: Impact on noise, image quality and diagnostic accuracy [J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2020, 14(5):444-451.
- [6] 中国肥胖问题工作组. 中国成人超重和肥胖症预防与控制指南 (节录) [J]. 营养学报, 2004, 26(1):1-4.
- [7] BENZ D C, GRÄNIC, MIKULICIC F, et al. Adaptive statistical iterative reconstruction-V: Impact on image quality in ultralow-dose coronary computed tomography angiography [J]. J Comput Assist Tomogr, 2016, 40(6):958-963.
- [8] LEIPSIC J, ABBARA S, ACHENBACH S, et al. SCCT guidelines for the interpretation and reporting of coronary CT angiography: A report of the Society of Cardiovascular Computed

- Tomography Guidelines Committee [J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2014, 8(5):342-358.
- [9] HAUSLEITER J, MEYER T, HERMANN F, et al. Estimated radiation dose associated with cardiac CT angiography [J]. JAMA, 2009, 301(5):500-507.
- [10] CHARTRAND G, CHENG P M, VORONTSOV E, et al. Deep learning: A primer for radiologists [J]. Radiographics, 2017, 37(7):2113-2131.
- [11] ALKADHI H, SCHEFFEL H, DESBIOLLES L, et al. Dual-source computed tomography coronary angiography: Influence of obesity, calcium load, and heart rate on diagnostic accuracy [J]. Eur Heart J, 2008, 29(6):766-776.
- [12] GREFFIER J, HAMARD A, PEREIRA F, et al. Image quality and dose reduction opportunity of deep learning image reconstruction algorithm for CT: A phantom study [J]. Eur Radiol, 2020, 30(7):3951-3959.

Color Doppler ultrasonic diagnosis of uterine incarceration and placenta accrete during pregnancy: Case report

彩色多普勒超声诊断妊娠子宫嵌顿并胎盘植入 1 例

王 钦, 高春燕, 熊 希, 张 玥

(陆军军医大学第二附属医院妇产科, 重庆 400037)

[Keywords] uterine incarceration; placenta accreta; ultrasonography

[关键词] 子宫嵌顿; 胎盘植入; 超声检查

DOI: 10.13929/j.issn.1003-3289.2021.05.030

[中图分类号] R714.25; R445.1 [文献标识码] B [文章编号] 1003-3289(2021)05-0758-01



图 1 子宫嵌顿并胎盘植入 A. 超声声像图显示子宫嵌顿(箭); B. 超声声像图显示胎盘植入(箭); C. 病理图(HE, ×40) (CX: 宫颈)

患者女, 34 岁, 因“停经 14 周余, 反复阴道出血 3 个月, 小便困难 10 余天”就诊; 既往孕 6 产 2, 人工流产 4 次, 剖宫产 2 次、子宫捆绑术 1 次。超声: 膀胱充盈, 左上缘达脐下 2 横指; 子宫增大, 呈后倾后屈位, 宫颈拉长, 紧贴膀胱后方, 宫体大部分位于子宫直肠陷窝内, 宫底平宫颈外口水平(图 1A); 宫腔内见单活胎, 头臀径 78 mm, 测值相当于 14 周, 羊水最大深度 34 mm, 颈部透明带 1.8 mm; 胎盘主要附着于子宫前壁, 0 级, 跨越宫颈内口达下段后壁 15 mm 处, 厚度 24 mm, 下段前壁胎盘后间隙消失, 实质内见多个血池回声, 最大 9 mm × 8 mm, 前壁局部肌层消失, 仅见浆膜层(图 1B); CDFI 于子宫下段前壁见丰富血流信号。超声诊断: ①单胎, 中期妊娠; ②子宫体位置异常, 膀胱充盈拉长, 考虑子宫嵌顿; ③胎盘前置并植入可能。行子宫手法复位及人工剥离胎盘术, 术中见膀胱上提, 粘连于腹前壁, 子宫下段表面血管丰富、迂曲、怒张, 宫体向下深埋于子宫直肠陷窝内, 胎盘植入子宫下段前壁; 手法复位及人工剥离

胎盘后见子宫肌层缺失。术后病理: 光镜下见宫腔退变、绒毛坏死及蜕膜组织, 局部侵及肌层, 符合胎盘植入(图 1C)。诊断: 子宫嵌顿并胎盘植入。

讨论 子宫嵌顿又称子宫箝闭, 指中期妊娠子宫增大, 后屈的子宫无法上升进入腹腔而呈持续后位, 使宫底固定于子宫直肠陷窝, 宫颈向上牵拉, 膀胱尿道受压变形, 造成膀胱出口梗阻; 随孕周增加, 易发生排尿困难、尿潴留及子宫循环障碍, 可导致子宫、膀胱破裂或胎儿宫内生长受限等。本例为 2 次剖宫产术及子宫捆绑术后患者, 术中见盆腔粘连, 导致宫体无法上升进入腹腔而发生子宫嵌顿, 需及早进行手法复位。对于后位子宫妊娠合并盆腔手术史孕妇, 超声应关注宫底上升位置, 警惕子宫嵌顿。鉴别诊断重点在于区分拉长变形的宫颈与正常肌层, 避免漏诊及误诊为子宫腺肌病。本例因数次手术导致子宫内膜损伤, 胎盘绒毛侵入子宫壁肌层造成胎盘植入, 易形成血窦, 应与瘢痕妊娠相鉴别。

[第一作者] 王钦(1989—), 女, 重庆人, 本科, 医师。E-mail: 526191745@qq.com

[收稿日期] 2020-11-24 [修回日期] 2021-04-08