

本文引用:郑志硕,李锋,梁长华,等.低管电压和低流速低剂量对比剂联合高权重深度学习图像重建在冠状动脉计算机体层摄影血管造影中的应用价值[J].新乡医学院学报,2023,40(2):150-153,158. DOI:10.7683/xyxyxb.2023.02.010.

【临床研究】

低管电压和低流速低剂量对比剂联合高权重深度学习图像重建在冠状动脉计算机体层摄影血管造影中的应用价值

郑志硕¹, 李 锋¹, 梁长华², 梁 盼³

(1. 新乡市中心医院医学影像科/新乡医学院第四临床学院,河南 新乡 453000;2. 新乡医学院第一附属医院放射科,河南 卫辉 453100;3. 郑州大学第一附属医院放射科,河南 郑州 450003)

摘要: **目的** 探讨低管电压和低流速低剂量对比剂联合高权重深度学习图像重建(DLIR-H)在冠状动脉计算机体层摄影血管造影(CCTA)中的应用价值。**方法** 选择2022年5~7月新乡市中心医院收治的体质量指数(BMI)为20~27 kg·m⁻²的60例疑似冠状动脉性心脏病患者为研究对象,按随机数字表法将患者分为观察组和对照组,每组30例。所有患者采用256排宽体探测器CT行CCTA前瞻性心电门控扫描。观察组扫描参数设置:管电压80 kV、自动管电流500~1 300 mA,对比剂注射流速3.5~4.0 mL·s⁻¹,对比剂碘海醇(350 g·L⁻¹)剂量35~40 mL,采用DLIR-H法重建。对照组扫描参数设置:管电压100 kV、自动管电流500~1 040 mA,对比剂注射流速5.0~5.5 mL·s⁻¹,对比剂碘海醇(350 g·L⁻¹)剂量50~55 mL,采用多模型迭代重建50%算法重建。对图像质量进行定量和定性分析,定量指标包括主动脉根部(AO)、左前降支(LAD)、左旋支(LCX)、右冠状动脉(RCA)近段血管的CT值及冠状动脉CT图像信噪比(SNR)和对比噪声比(CNR),定性指标包括图像条纹伪影、血管边缘锐利度及总体图像质量的评分。扫描结束后,统计患者CT剂量指数(CTDI)、放射剂量长度乘积(DLP)及有效辐射剂量(ED)。**结果** 观察组患者AO、LAD和RCA的CT值显著高于对照组($P<0.05$),2组患者LCX的CT值比较差异无统计学意义($P>0.05$)。观察组患者冠状动脉CT图像的SNR显著低于对照组($P<0.05$),观察组患者冠状动脉CT图像的CNR显著高于对照组($P<0.05$)。观察组患者冠状动脉CT图像条纹伪影、血管边缘锐利度及总体图像质量的评分显著高于对照组($P<0.05$);观察组患者ED、DLP、CTDI显著低于对照组($P<0.05$)。**结论** 对于BMI为20~27 kg·m⁻²的患者,低管电压和低流速低剂量对比剂联合DLIR-H可生成高质量的CCTA图像。

关键词: 冠状动脉;计算机体层摄影血管造影;高权重深度学习图像重建

中图分类号: R541.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7239(2023)02-0150-05

Application value of low tube voltage, low flow rate and low dose contrast agent combined with high-strength deep learning image reconstruction in coronary computed tomography angiography

ZHENG Zhishuo¹, LI Feng¹, LIANG Changhua², LIANG Pan³

(1. Department of Medical Imaging, Xinxiang Central Hospital/the Fourth Clinical College of Xinxiang Medical University, Xinxiang 453000, Henan Province, China; 2. Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Xinxiang Medical University, Weihui 453100, Henan Province, China; 3. Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450003, Henan Province, China)

Abstract: **Objective** To investigate the application value of low tube voltage, low flow rate and low dose contrast agent combined with high-strength deep learning image reconstruction (DLIR-H) in coronary computed tomography angiography (CCTA). **Methods** A total of 60 patients with suspected coronary heart disease with the body mass index (BMI) of 20~27 kg·m⁻² admitted to Xinxiang Central Hospital from May to July 2022 were selected as the research subjects, and the patients were divided into observation group and control group according to the random number table method, with 30 patients in each group. All patients underwent CCTA prospective electrocardiogram gating scan with 256-row wide body detector CT. The parameters in the observation group were set as tube voltage 80 kV, automatic tube current 500~1 300 mA, flow rate of contrast medium 3.5~4.0 mL·s⁻¹, dose of 350 g·L⁻¹ contrast medium iohexol 35~40 mL; DLIR-H method was used for reconstruction. The parameters in the control group were set as tube voltage 100 kV, automatic tube current 500~

DOI: 10.7683/xyxyxb.2023.02.010

收稿日期: 2022-09-06

基金项目: 河南省医学科技攻关计划联合共建项目(编号: LHGJ20220999)。

作者简介: 郑志硕(1986-), 男, 黑龙江双鸭山人, 学士, 主管技师, 研究方向: 影像检查新技术、新方法及规范化影像学检查。

通信作者: 李 锋(1980-), 男, 黑龙江牡丹江人, 硕士, 副主任医师, 研究方向: 疑难心血管疾病诊断; E-mail: 59345994@qq.com。

1 040 mA, flow rate of contrast medium $5.0 \sim 5.5 \text{ mL} \cdot \text{s}^{-1}$, and dose of $350 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ contrast agent iohexol $50 \sim 55 \text{ mL}$; the adaptive statistical iterative reconstruction-V 50% algorithm was used for reconstruction. The image quality was analyzed quantitatively and qualitatively. The quantitative indexes included the CT values of aortic root (AO), left anterior descending (LAD), left circumflex (LCX) and proximal vessels of right coronary artery (RCA), as well as the signal to noise ratio (SNR) and contrast to noise ratio (CNR) of coronary artery CT images. The qualitative indexes included the score of image fringe artifacts, vascular edge sharpness and overall image quality. After scanning, the CT dose index (CTDI), radiation dose length product (DLP) and effective dose (ED) of patients were counted. **Results** The CT values of AO, LAD and RCA of patients in the observation group were significantly higher than those in the control group ($P < 0.05$). There was no significant difference in the CT value of LCX of patients between the two groups ($P > 0.05$). The SNR of coronary artery CT image of patients in the observation group was significantly lower than that in the control group ($P < 0.05$), and the CNR of coronary artery CT image of patients in the observation group was significantly higher than that in the control group ($P < 0.05$). The scores of fringe artifacts, vascular edge sharpness and overall image quality of coronary artery CT image in the observation group were significantly higher than those in the control group ($P < 0.05$). The ED, DLP and CTDI of patients in the observation group were significantly lower than those in the control group ($P < 0.05$). **Conclusion** For the patients with BMI of $20 \sim 27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, the low tube voltage, low flow rate and low dose contrast agent combined with DLIR-H can achieve better quality CCTA imaging.

Key words: coronary artery; coronary computed tomography angiography; high-strength deep learning image reconstruction

冠状动脉计算机体层摄影血管造影 (coronary computed tomography angiography, CCTA) 已广泛应用于冠状动脉疾病的评估,然而,高辐射剂量所致的潜在癌变风险也引起了人们广泛关注。目前有多种方式可降低 CT 扫描辐射剂量,如降低管电压和管电流、大螺距技术、前瞻性心电触发扫描技术、迭代重建技术等^[1-2]。近年来,随着人工智能技术不断完善,深度学习技术已逐渐应用于医学领域。深度学习图像重建 (deep learning image reconstruction, DLIR),利用设计的深度神经网络在保持低 X 射线剂量和例行 CT 正常处理能力的同时,生成高质量的 CT 图像,该图像具有出色的空间分辨率、低对比度可检测性和自然的图像纹理。研究显示,高权重深度学习图像重建 (high-strength deep learning image reconstruction, DLIR-H) 在保证诊断准确性的前提下,可以显著降低约 43% 的图像噪声,提高约 62% 的图像质量^[3-4]。本研究旨在探讨低管电压和低流速低剂量对比剂联合 DLIR-H 在 CCTA 中的应用价值。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选择 2022 年 5 ~ 7 月新乡市中心医院收治的疑似冠状动脉性心脏病患者为研究对象。病例纳入标准: (1) 体质量指数 (body mass index, BMI) $20 \sim 27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$; (2) 经 CT 图像后处理分析冠状动脉钙化积分 < 400 ; (3) 患者均采用 256 排宽体探测器 CT 行 CCTA 前瞻性心电门控扫描。排除标准: (1) 对比剂过敏; (2) 肾功能不全; (3) 既往行冠状动脉支架植入术; (4) 心力衰竭,纽约心脏病协会心功能分级 III、IV 级。本研究共纳入疑似冠状动脉性心脏病患者 60 例,按随机数字表法将患者分为观察组和对照组,每组 30 例。观察组:男 16 例,

女 14 例;年龄 $34 \sim 80 (52.96 \pm 11.61)$ 岁, BMI $21.2 \sim 26.7 (24.46 \pm 1.80) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。对照组:男 19 例,女 11 例;年龄 $38 \sim 84 (52.50 \pm 11.20)$ 岁, BMI $21.1 \sim 27.0 (24.87 \pm 1.57) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。2 组患者的性别、年龄、BMI 比较差异无统计学意义 ($P > 0.05$),具有可比性。本研究经过医院伦理委员会批准,所有患者和 (或) 家属签署知情同意书。

1.2 CCTA 检查方法 所有患者采用 256 排宽体探测器 CT 行 CCTA 前瞻性心电门控扫描,使用 GE Revolution Apex 256 排宽体探测器 CT (美国 GE 公司),单心跳轴扫模式;足先进,仰卧位,双手上举置于头部两侧,扫描范围为左、右主支气管分叉处至心底。观察组扫描参数设置:管电压 80 kV、自动管电流 $500 \sim 1\,300 \text{ mA}$,对比剂注射流速 $3.5 \sim 4.0 \text{ mL} \cdot \text{s}^{-1}$,对比剂碘海醇 ($350 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 剂量 $35 \sim 40 \text{ mL}$,采用 DLIR-H 法重建。对照组扫描参数设置:管电压 100 kV、自动管电流 $500 \sim 1\,040 \text{ mA}$,对比剂注射流速 $5.0 \sim 5.5 \text{ mL} \cdot \text{s}^{-1}$,对比剂碘海醇 ($350 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 剂量 $50 \sim 55 \text{ mL}$,采用多模型迭代重建 (adaptive statistical iterative reconstruction-V, ASIR-V) 50% 算法重建。其他参数设置:转速 $0.28 \text{ s} \cdot \text{r}^{-1}$,扫描层厚 0.625 mm ;团注跟踪技术,在降主动脉设置感兴趣区,阈值 150 HU,延迟时间 8 s,平静呼吸屏气曝光扫描;使用 CT 设备自带的智能时相技术自动推荐最佳心脏时相,采用快速冻结技术 (snap shot freeze, SSF) 进行心脏搏动伪影校正。

1.3 图像质量分析

1.3.1 定量分析 运用工作站的右键 Clone 功能进行测量,以保证感兴趣区选择的形态及大小一致。由 2 位高年资医师在同期相同层面分别测量主动脉根部 (aorta, AO) 和邻近胸壁脂肪组织的 CT 值及其

标准差 (standard deviation, SD);同时测量左前降支 (left anterior descending, LAD)、左旋支 (left circumflex, LCX)、右冠状动脉 (right coronary artery, RCA) 近段血管的 CT 值及其 SD 值,以及同层面目标血管邻近胸壁脂肪组织的 CT 值及其 SD 值,计算冠状动脉 CT 图像信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 及对比噪声比 (contrast to noise ratio, CNR)。计算公式:冠状动脉 CT 图像 SNR = 冠状动脉 CT 值/SD 值;CNR = (冠状动脉 CT 值 - 胸壁脂肪 CT 值)/脂肪组织 SD 值。

1.3.2 定性分析 由 2 位高年资医师分别对图像质量进行双盲定性评价,当评价结果不一致时经过讨论达成统一。定性评价指标包括图像条纹伪影、血管边缘锐利度及总体图像质量^[4-5]。图像条纹伪影评分:1 分:条纹伪影严重且不可评估;2 分:条纹伪影干扰冠状动脉评估;3 分:条纹伪影尚可,不干扰冠状动脉评估;4 分:条纹伪影低于平均水平;5 分:条纹伪影很少或不存在。血管边缘锐利度评分:1 分:血管边缘模糊且不可评估;2 分:血管边缘锐利度比平均水平差;3 分:血管边缘锐利度处于平均水平;4 分:血管边缘锐利度好于平均水平;5 分:血管边缘清晰。总体图像质量评分:1 分:总体图像质量

表 1 2 组患者冠状动脉各分支的 CT 值和图像噪声比较

		CT 值/(HU)				SNR	CNR
组别	n	AO	LAD	LCX	RCA		
对照组	30	514.63 ± 87.30	477.76 ± 80.68	474.54 ± 88.44	477.40 ± 78.40	23.84 ± 3.64	34.11 ± 6.19
观察组	30	578.80 ± 107.27	548.50 ± 92.44	516.88 ± 100.94	547.04 ± 102.21	16.33 ± 2.14	43.69 ± 7.04
t		2.541	3.158	1.728	2.961	-9.731	5.598
P		0.014	0.003	0.089	0.004	0.001	0.001

2.2 2 组患者图像质量定性指标比较 结果见表 2。观察组患者冠状动脉 CT 图像条纹伪影、血管边缘锐利度及总体图像质量的评分显著高于对照组,差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。

表 2 2 组患者总体图像质量、图像条纹伪影及血管边缘锐利度的评分比较

		比较结果		
组别	n	图像条纹伪影评分	血管边缘锐利度评分	总体图像质量评分
对照组	30	4.17 ± 0.79	3.90 ± 0.84	4.03 ± 0.85
观察组	30	4.63 ± 0.56	4.33 ± 0.80	4.53 ± 0.73
t		2.443	2.073	2.443
P		0.018	0.046	0.018

2.3 2 组患者 CT 辐射剂量比较 结果见表 3。观察组患者 ED、DLP、CTDI 显著低于对照组,差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。

不可接受;2 分:总体图像质量差;3 分:总体图像质量尚可;4 分:总体图像质量好;5 分:总体图像质量优秀。评价图像时允许调整窗宽及窗位。

1.4 辐射剂量 扫描结束后,按照系统自动生成的 CT 剂量指数 (CT dose index, CTDI)、放射剂量长度乘积 (dose length product, DLP) 来计算患者接受的有效辐射剂量 (effective dose, ED), $ED = k \times DLP$, k 为转换系数, $k = 0.014 \text{ mSV}$ 。

1.5 统计学处理 应用 SPSS 21.0 软件进行数据统计与分析。计量资料以均数 ± 标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示,两两比较采用 t 检验, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 2 组患者图像质量定量指标比较 结果见表 1。观察组患者 AO、LAD 和 RCA 的 CT 值显著高于对照组,差异有统计学意义 ($P < 0.05$);2 组患者 LCX 的 CT 值比较差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。观察组患者冠状动脉 CT 图像的 SNR 显著低于对照组,差异有统计学意义 ($P < 0.05$);观察组患者冠状动脉 CT 图像的 CNR 显著高于对照组,差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。

表 3 2 组患者 CT 辐射剂量比较

		比较结果		
组别	n	DLP/(mGy · cm)	ED/(mSV)	CTDI/(mGy)
对照组	30	354.07 ± 41.56	4.95 ± 0.58	22.13 ± 2.59
观察组	30	190.47 ± 17.28	2.65 ± 0.24	12.51 ± 1.16
t		-19.906	-19.977	-18.556
P		0.001	0.001	0.001

3 讨论

随着 CT 血管造影检查的广泛应用, CCTA 凭借其无创、便捷等优势,已成为诊断冠状动脉疾病首选的影像学方法。同时,保证 CT 图像质量的前提下如何降低伴随而来的高辐射剂量一直是业界研究的热点和难点问题,目前已有多种降低 CT 扫描辐射剂量的文献报道。虽然越来越多的 CT 设备具备低千伏 (70 ~ 100 kV) 扫描能力,但是为了保证 CT 图

像质量就需要提高扫描图像中冠状动脉的 CT 值,以便更好地显示血管,鉴于低管电压可以显著提升碘的 CT 值,因此,在相同碘流率的情况下,使用更低的管电压扫描可以获得更高的 CT 值。此外,为了保证图像质量,低管电压扫描需要更高的管电流,但是当管电流超过球管的限制时会导致图像质量下降,因此还需要考虑低管电压下的最大管电流限制。目前,GE Revolution Apex CT 扫描设备可以在 80 kV 管电压下提供 500 ~ 1 300 mA 管电流,并且不影响图像质量。

以往为了获得高质量的冠状动脉 CT 图像,常规应用 120 kV 管电压和 370 g · L⁻¹对比剂^[6-9],但高管电压和高浓度对比剂会造成潜在辐射剂量和对比剂肾病风险增加,鉴于此,在保证图像质量的前提下,最大程度地降低患者的辐射剂量和对比剂注射流速、注射用量就显得非常必要^[10]。DLIR-H 是以滤波反投影法图像为“金标准”进行训练,对比 2 组图像的噪声、噪声纹理、低对比度分辨率等多个参数,将得出的差异反馈于深度神经网络供其修改,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。本研究采用 80 kV 管电压、自动管电流 500 ~ 1 300 mA 扫描、对比剂注射流速 3.5 ~ 4.0 mL · s⁻¹、350 g · L⁻¹对比剂用量 35 ~ 40 mL 的扫描方案联合 DLIR-H 算法,结果显示,观察组 AO、LAD 和 RCA 的 CT 值显著高于对照组,且冠状动脉 CT 图像条纹伪影、血管边缘锐利度及总体图像质量的评分显著高于对照组,ED、DLP、CTDI 显著低于对照组,提示观察组所获得的 CT 图像质量优于对照组,且能满足诊断要求,有效降低辐射剂量。

80 kV 管电压的应用使 X 线平均电子能量更接近于碘原子的 K 缘,对比剂衰减效果增强,目标血管 CT 值明显增加,可保证大幅度降低对比剂用量,降低注射流速,从而有效减少对比剂不良反应的发生,降低对比剂外渗的风险^[11]。与 ASIR-V 50% 算法不同,DLIR-H 拥有较大的降噪能力,通过厚层图像创建的薄层图像虚拟可改善空间分辨率,同时可有效改善线束硬化伪影,且由于噪声和辐射剂量密切相关,DLIR-H 可实现更低的辐射剂量、注射流速和对比剂用量^[12-13]。深度学习重建利用设计的深度神经网络,在保持低 X 射线剂量和 CT 正常处理能力的同时,可生成高质量的 CT 图像,该图像具有较高的空间分辨率、低对比度可检测性和自然的图像纹理^[14-15]。本研究结果显示,观察组患者冠状动脉 CT 图像的 SNR 显著低于对照组,CNR 显著高于对照组,提示采用 80 kV 管电压联合 DLIR-H 具有更佳的图像修正能力,DLIR-H 具有良好的降噪

能力。

本研究尚存在一些不足之处:(1)本研究时间较短,纳入患者偏少,需要增加样本量进一步研究;(2)本研究入组患者 BMI 为 20 ~ 27 kg · m⁻²,未对超重及肥胖患者进行研究,可能会存在选择性偏倚;(3)本研究未纳入冠状动脉支架植入术后及冠状动脉严重钙化患者,DLIR-H 对此类患者的临床应用效果有待进一步探究。

综上所述,采用 80 kV 管电压联合 DLIR-H 获得的 CT 图像的质量优于 100 kV 管电压联合 ASIR-V 50% 算法,且辐射剂量降低。因此,对于 BMI 为 20 ~ 27 kg · m⁻²的患者,80 kV 管电压、低对比剂用量、低对比剂流速的扫描方案联合 DLIR-H 是可行的,可有效降低辐射剂量及对比剂用量,同时改善 CCTA 扫描图像质量。

参考文献:

[1] RICHARDS C E, OBAID D R. Low-dose radiation advances in coronary computed tomography angiography in the diagnosis of coronary artery disease[J]. *Curr Cardiol Rev*, 2019, 15(4): 304-315.

[2] LIU P J, WANG M, WANG Y N, *et al*. Impact of deep learning-based optimization algorithm on image quality of low-dose coronary CT angiography with noise reduction: a prospective study[J]. *Acad Radiol*, 2020, 27(9): 1241-1248.

[3] BENZ D C, ERSÖZLÜ S, MOJON F L A, *et al*. Radiation dose reduction with deep-learning image reconstruction for coronary computed tomography angiography [J]. *Eur Radiol*, 2022, 32(4): 2620-2628.

[4] 赵正凯, 周瀚, 程绍玲, 等. 80 kVp 低管电压扫描联合全模型迭代重建冠状动脉 CTA 成像的临床应用[J]. 大连医科大学学报, 2019, 41(6): 506-510.
ZHAO Z K, ZHOU H, CHENG S L, *et al*. Clinical application of coronary CTA at 80 kVp combined with iterative model reconstruction[J]. *J Dalian Med Univ*, 2019, 41(6): 506-510.

[5] 国家心血管病专业质控中心心血管影像质控专家工作组, 中华医学会放射学分会心胸学组. 《中华放射学杂志》心脏冠状动脉多排 CT 临床应用指南写作专家组. 冠状动脉 CT 血管成像的适用标准及诊断报告书写规范[J]. 中华放射学杂志, 2020, 54(11): 1044-1055.
EXPERT WORKING GROUP OF CARDIOVASCULAR IMAGING OF NATIONAL CENTER FOR MEDICAL QUALITY CONTROL OF CARDIOVASCULAR DISEASES, CHINESE MEDICAL ASSOCIATION RADIOLOGY SOCIETY CARDIAC-CHEST GROUP, CARDIAC AND CORONARY CT ANGIOGRAPHY GUIDELINE WRITING GROUP OF CHINESE JOURNAL OF RADIOLOGY. Standards of appropriate utilization and diagnostic reporting on coronary CT angiography: coronary artery disease-reporting and data system in China[J]. *Chin J Radiol*, 2020, 54(11): 1044-1055.

SHAN J P,LI Q H. Pathological analysis of renal biopsy in 65 patients with asymptomatic simple hematuria[J]. *Chin J Integr Trad Western Nephrol*,2012,13(7):632.

[4] 孙智才,刘玉玲,潘晓芬,等. 儿童无症状血尿 431 例病因分析及随访[J]. 临床儿科杂志,2015,33(9):810-812.

SUN Z C,LIU Y L,PAN X F,et al. Etiological analysis of asymptomatic hematuria in 431 children and follow-up[J]. *J Clin Pediatr*, 2015,33(9):810-812.

[5] YAMAGATA K,TAKAHASHI H,TOMIDA C,et al. Prognosis of asymptomatic hematuria and/or proteinuria in men. High prevalence of IgA nephropathy among proteinuric patients found in mass screening[J]. *Nephron*,2002,91(1):34.

[6] 中华医学会儿科学分会肾脏学组. 原发性 IgA 肾病诊治循证指南(2016)[J]. 中华儿科杂志,2017,55(9):643-646.

NEPHROLOGY GROUP OF PEDIATRIC BRANCH OF CHINESE MEDICAL ASSOCIATION. Evidence based guidelines for the diagnosis and treatment of primary IgA nephropathy(2016)[J]. *Chin J Pediatr*,2017,55(9):643-646.

[7] 朱晓光,时军. 192 例隐匿性肾小球肾炎患者的临床病理特征及预后分析[J]. 中国实用医药,2014,9(27):61-62.

ZHU X G,SHI J. Clinicopathological characteristics and prognosis of 192 patients with occult glomerulonephritis[J]. *Chin Pract Med*,2014,9(27):61-62.

[8] 高伟,张亚莉,冯学亮. 355 例隐匿性肾小球肾炎临床与病理分析[J]. 陕西医学杂志,2012,41(4):473-474.

GAO Y,ZHANG Y L,FENG X L. Clinical and pathological analysis of 355 cases of occult glomerulonephritis[J]. *Shaanxi Med J*, 2012,41(4):473-474.

[9] REMUZZI G,BENIGNI A,REMUZZI A. Mechanisms of progression and regression of renal lesions of chronic nephropathies and diabetes[J]. *J Clin Invest*,2006,116(2):288-296.

[10] 李玉峰,卫敏江,吴伟岚,等. 儿童无症状血尿肾穿刺指征探讨[J]. 临床儿科杂志,2017,35(7):494-497.

LI Y F,WEI M J,WU W L,et al. Indications for percutaneous renal biopsy in children with asymptomatic hematuria[J]. *J Clin Pediatr*,2017,35(7):494-497.

[11] SAVIGE J,GREGORY M,GROSS O,et al. Expert guidelines for the management of Alport syndrome and thin basement membrane nephropathy[J]. *J Am Soc Nephrol*,2013,24(3):364-375.

[12] 吴红梅,赵三龙,黄松明,等. 儿童孤立性血尿临床病理分析[J]. 中华肾脏病杂志,2012,28(8):643-644.

WU H M,ZHAO S L,HUANG S M,et al. Clinicopathological analysis of isolated hematuria in children[J]. *Chin J Nephrol*, 2012,28(8):643-644.

[13] LONG J,BADAL S S,YE Z,et al. Long noncoding RNA Tug1 regulates mitochondrial bioenergetics in diabetic nephropathy[J]. *J Clin Invest*,2016,126(11):4205-4218.

[14] ICHIMOTO E,JO K,KOBAYASHI Y,et al. Prognostic significance of cystatin C in patients with ST-elevation myocardial infarction[J]. *Circ J*,2009,73(9):1669-1673.

[15] WANG F,ZHANG Y H. Relationship of cystatin C, fibrinogen, and 24-hour urinary protein with renal pathological grade in children with Henoch-Schonlein purpura nephritis[J]. *Chin J Contemp Pediatr*,2016,18(3):233-237.

(本文编辑:郭 潇)

(上接第 153 页)

[6] 赵娜,高扬,徐波,等. 基于冠状动脉 CT 血管成像的狭窄率与斑块特征联合分析对提高 CT 诊断心肌缺血效能的价值[J]. 中华放射学杂志,2021,55(1):40-47.

ZHAO N,GAO Y,XU B,et al. The value of combined analysis of plaque characteristics and stenosis based on coronary CT angiography in improving CT diagnostic performance for lesion-specific myocardial ischemia[J]. *Chin J Radiol*,2021,55(1):40-47.

[7] RU L,LAN P X,XU C C,et al. The value of coronary CTA in the diagnosis of coronary artery disease[J]. *Am J Transl Res*,2021,13(5):5287-5293.

[8] JUNGMAHN F,EMRICH T,MILDENBERGER P,et al. Multidetector computed tomography angiography (MD-CTA) of coronary artery bypass grafts-update 2017[J]. *Rofo*,2018,190(3):237-249.

[9] TUNCAY V,VLEGENTHART R,DEN DEKKER MAM,et al. Non-invasive assessment of coronary artery geometry using coronary CTA[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*,2018,12(3):257-260.

[10] 马伟,赵娜,高扬,等. 应用个体化扫描和碘流率注射方案降低 CT 心肌灌注成像辐射剂量的可行性研究[J]. 中华放射学杂志,2021,55(4):409-414.

MA W,ZHAO N,GAO Y,et al. Feasibility of individualized scanning and contrast agent injection protocol to reduce the radiation dose of dynamic myocardial perfusion imaging[J]. *Chin J Radiol*, 2021,55(4):409-414.

[11] 文雨婷,李万江,李真林,等. 超低管电压联合 DLIR-H 算法在冠状动脉 CT 血管成像"双低"扫描中的应用价值[J]. 中国医疗设备,2022,37(2):78-81,88.

WEN Y T,LI W J,LI Z L,et al. Application value of ultra low tube voltage combined with DLIR-H algorithm in reducing both radiation and contrast doses in coronary CT angiography[J]. *Chin Med Devices*,2022,37(2):78-81,88.

[12] 孙记航,刘志敏,霍爱华,等. 70 kVp 联合深度学习算法改进儿童腹部双低 CTA 图像质量的研究[J]. 影像诊断与介入放射学,2021,30(1):34-38.

SUN J H,LIU Z M,HUO A H,et al. Improving image quality of double-low abdominal CT angiography in children by using 70 kVp and deep learning image reconstruction[J]. *Diagn Imaging Interv Radiol*,2021,30(1):34-38.

[13] TSUKADA J,YAMADA M,YAMADA Y,et al. Comparison of the diagnostic accuracy of FBP, ASiR, and MBIR reconstruction during CT angiography in the evaluation of a vessel phantom with calcified stenosis in a distal superficial femoral artery in a cadaver extremity[J]. *Medicine*,2016,95(27):e4127.

[14] WANG Y R,ZHAN H F,HOU J M,et al. Influence of deep learning image reconstruction and adaptive statistical iterative reconstruction-V on coronary artery calcium quantification[J]. *Ann Transl Med*,2021,9(23):1726.

[15] NODA Y,KAGA T,KAWAI N,et al. Low-dose whole-body CT using deep learning image reconstruction: image quality and lesion detection[J]. *Br J Radiol*,2021,94(1121):20201329.

(本文编辑:徐自超)