

## Photon-counting CT virtual non-contrast replacing conventional non-contrast CT for evaluating colorectal cancer

ZHANG Lele, ZHU Lina, NIE Kehui, GU Yanbo, LI Liming, GAO Jianbo\*

(Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

**[Abstract]** **Objective** To investigate the feasibility of photon-counting CT (PCCT) virtual non-contrast in replacing conventional non-contrast CT for evaluating colorectal cancer. **Methods** PCCT was prospectively performed in 50 patients with colorectal cancer. Subjective and objective evaluation results were compared among true non-contrast (TNC), arterial phase virtual non-contrast (VNC-AP), venous phase virtual non-contrast (VNC-VP), arterial phase pure calcium (PC-AP) and venous phase pure calcium (PC-VP) images. The reduction rate of effective dose (ED) of dual-phase contrast-enhanced scanning relative to non-contrast plus dual-phase contrast-enhanced scanning was calculated. **Results** TNC, VNC-AP, PC-AP, VNC-VP and PC-VP images all met diagnostic requirements (score  $\geq 3$ ). No significant difference of overall imaging quality score was found between PC-VP and TNC ( $P > 0.05$ ), which of the two were both higher than that of VNC-AP, PC-AP and VNC-VP (all  $P < 0.05$ ). No significant difference of lesion conspicuity score was observed among PC-AP, PC-VP and TNC (all  $P > 0.05$ ), of which were higher than those of VNC-AP and VNC-VP (all  $P < 0.05$ ). No significant difference of CT values of tumor regions, adjacent nontumor intestinal walls nor subcutaneous adipose tissue was found between PC-VP and TNC (all  $P > 0.05$ ). The contrast-to-noise ratio (CNR) of both tumors and liver on VNC-AP and VNC-VP were lower than those on TNC, PC-AP and PC-VP (all  $P < 0.05$ ). Compared with non-contrast plus dual-phase contrast-enhanced scanning, ED of dual-phase enhanced scanning alone reduced by 38.92% ( $[11.72 \pm 2.67]$  mSv vs.  $[19.19 \pm 4.38]$  mSv). **Conclusion** PCCT PC-VP were more comparable to TNC images with significantly reduced ED, which was a viable alternative to conventional non-contrast CT for evaluating colorectal cancer.

**[Keywords]** colorectal neoplasms; tomography, X-ray computed; photons; radiation dosage; prospective studies

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2026.03.026

## 以光子计数 CT 虚拟平扫替代常规 CT 平扫评估结直肠癌

张乐乐, 朱丽娜, 聂可卉, 谷艳博, 李莉明, 高剑波\*

(郑州大学第一附属医院放射科, 河南 郑州 450052)

**[摘要]** **目的** 探讨光子计数 CT(PCCT)虚拟平扫替代常规 CT 平扫评估结直肠癌的可行性。**方法** 前瞻性对 50 例结直肠癌患者行 PCCT 检查,对真实平扫(TNC)、动脉期虚拟平扫(VNC-AP)、静脉期虚拟平扫(VNC-VP)、动脉期纯净钙化(PC-AP)、静脉期纯净钙化(PC-VP)图像进行主、客观评价;计算双期增强扫描相比平扫+双期增强扫描的有效剂量(ED)下降率。**结果** TNC、VNC-AP、PC-AP、VNC-VP 及 PC-VP 图像均符合诊断要求(评分 $\geq 3$ );PC-VP 与 TNC 图像总体质量评分差异无统计学意义( $P > 0.05$ )且均高于 VNC-AP、PC-AP 及 VNC-VP( $P$ 均 $< 0.05$ );PC-AP、PC-VP 与 TNC 显示病灶清晰度评分差异均无统计学意义( $P$ 均 $> 0.05$ )且均高于 VNC-AP 及 VNC-VP( $P$ 均 $< 0.05$ )。基于 PC-VP 与 TNC 图所测肿瘤区域、邻近非瘤肠壁及皮下脂肪 CT 值差异均无统计学意义( $P$ 均 $> 0.05$ );VNC-AP 及 VNC-VP 图肿瘤及肝脏对比度噪声比(CNR)均低于 TNC、PC-AP 及 PC-VP( $P$ 均 $< 0.05$ )。相比平扫+双期增强扫描,双期增强扫描 ED

**[第一作者]** 张乐乐(1991—),女,河南三门峡人,硕士,主治医师。研究方向:结直肠癌影像学。E-mail: 13837172647@163.com

**[通信作者]** 高剑波,郑州大学第一附属医院放射科,450052。E-mail: cjr.gaojianbo@vip.163.com

**[收稿日期]** 2025-11-04 **[修回日期]** 2026-02-23

下降 38.92%[(11.72±2.67)mSv vs. (19.19±4.38)mSv]。结论 PCCT PC-VP 图像更接近 TNC 而 ED 显著降低,可替代常规 CT 平扫用于评估结直肠癌。

[关键词] 结直肠肿瘤; 体层摄影术, X 线计算机; 光子; 辐射剂量; 前瞻性研究

[中图分类号] R735.3; R814.42 [文献标识码] A [文章编号] 1003-3289(2026)03-0448-05

诊断、治疗结直肠癌及评估预后高度依赖腹部增强 CT,但其带来的累积辐射暴露问题不容忽视。基于物质分离技术的双能量 CT 虚拟平扫(virtual non-contrast, VNC)可缩短扫描时间、降低辐射剂量,现已应用于全身多部位/器官成像<sup>[1-2]</sup>。新一代光子计数 CT(photon-counting CT, PCCT)兼具 VNC 及纯净钙化(pure calcium, PC)算法,后者可在去碘的同时更好地保留钙化成分,主要用于心血管领域<sup>[3]</sup>,而少见用于结直肠癌相关研究。本研究探讨以 PCCT PC 及 VNC 算法替代常规 CT 平扫评估结直肠癌的可行性。

## 1 资料与方法

1.1 研究对象 前瞻性收集郑州大学第一附属医院 2024 年 9 月—2025 年 6 月接受腹部 PCCT 检查并经术后病理确诊的 50 例结直肠癌,男 28 例、女 22 例,年龄 33~87 岁、平均(61.0±10.9)岁;病灶位于直肠 34 例、乙状结肠 7 例、直肠乙状结肠交界 5 例、降结肠 2 例,横结肠及升结肠各 1 例,术后病理证实 48 例为腺癌、2 例为黏液腺癌;排除检查前接受新辅助治疗者。本研究经院伦理委员会批准(2024-KY-1106-002),患者均签署知情同意书。

1.2 仪器与方法 采用 Siemens NAEOTOM Alpha PCCT 机行腹部平扫及增强扫描,管电压 140 kVp,自动管电流调制技术(CareDose 4D, IQ level=190),X 线管转速 0.5 s/rot,准直器 144×0.4 mm,螺距 0.8;经肘前静脉以流率 2.5 ml/s 注射碘佛醇(370 mgI/ml)1.2 ml/kg 体质量,于腹主动脉阈值达 140 HU 时延迟 11 s 行动脉期(arterial phase, AP)扫描,之后延迟 35 s 行静脉期(venous phase, VP)扫描。分别以 VNC 及 PC 算法重建 VNC-AP、VNC-VP、PC-AP 及 PC-VP 图像,重建层厚 1.0 mm,层间距 0.7 mm,重建能级 60 keV, QIR4,重建内核 Br40。

### 1.3 评价图像质量

1.3.1 主观评分 隐藏图像序列信息后,由 2 名具有 5 年以上影像学诊断经验的影像科医师(医师 1、2)采用 5 分法<sup>[4]</sup>评价图像总体质量及显示病灶清晰度:1 分,病灶边界及周围结构不清晰,图像伪影及噪声明显,不满足诊断要求;2 分,病灶边界及周围结构边缘模糊,图像伪影及噪声较明显,不满足诊断要求;3 分,

病灶边缘尚清晰,周围脂肪间隙及淋巴结边界稍模糊,图像有伪影,但大部分解剖结构及细节可满足诊断要求;4 分,病灶边缘较锐利,周围脂肪间隙及淋巴结边界较清晰,图像轻微噪声或伪影,可诊断;5 分,病灶边缘锐利,周围脂肪间隙及淋巴结边界清晰,图像无明显噪声或伪影,可明确诊断。

1.3.2 客观评价 由医师 1 于 Siemens Syngo. via (VB60) 后处理工作站选取真实平扫(true non-contrast, TNC)、VNC-AP、VNC-VP、PC-AP 及 PC-VP 显示肿瘤最大层面,分别于肿瘤区域(避开坏死、黏液、脂肪、血管及气体)、邻近非瘤肠壁、椎旁肌/臀大肌(结肠癌选择椎旁肌、直肠癌选择臀大肌)、皮下脂肪,以及其他层面内的肝脏及腹主动脉(腹腔干水平)放置面积 50~100 mm<sup>2</sup> 的 ROI 并复制于其他图像中,测量各 ROI CT 值;以 CT 值标准差(standard deviation, SD)为图像噪声,计算肿瘤及肝脏对比度噪声比(contrast-to-noise ratio, CNR): $CNR_{\text{肿瘤/肝脏}} = (CT \text{ 值}_{\text{肿瘤/肝脏}} - CT \text{ 值}_{\text{皮下脂肪}}) / SD_{\text{皮下脂肪}}$ 。随机抽取 10 例,由医师 2 进行重复测量,将结果用于一致性评估,以组内相关系数(intra-class correlation coefficient, ICC)>0.75 为一致性良好。

1.4 辐射剂量 记录平扫及双期增强扫描剂量长度乘积(dose-length product, DLP)及容积 CT 剂量指数(volume CT dose index, CTDIvol),计算有效剂量(effective dose, ED): $ED = DLP \times k [k = 0.015 \text{ mSv} / (\text{mGy} \cdot \text{cm})]$ 。

1.5 统计学分析 采用 SPSS 22.0 及 MedCalc 22.0 统计分析软件。以  $\bar{x} \pm s$  表示正态分布计量资料,以中位数(上下四分位数)表示不符合者。采用 Friedman 秩和检验法进行多组间比较,差异有统计学意义时以 Bonferroni 法校正的事后检验行两两比较。采用 Bland-Altman 分析基于 VNC-AP、PC-AP、VNC-VP、PC-VP 与基于 TNC 所测肿瘤区域、邻近非瘤肠壁、椎旁肌/臀大肌、皮下脂肪、肝脏及腹主动脉 CT 值的一致性,以  $\bar{x} \pm 1.96s$  作为一致性界限(limits of agreement, LOA)。以 Kappa 检验评估观察者间主观评分结果的一致性(Kappa>0.75 为一致性良好)。P<0.05 为差异有统计学意义。

## 2 结果

2.1 主观评分 2 名医师评价 TNC、VNC-AP、PC-AP、VNC-VP 及 PC-VP 图像总体质量及显示病灶清晰度的一致性均良好(Kappa 0.757~0.865), 图像均符合诊断要求; VNC-AP、PC-AP、VNC-VP 及 PC-VP 分别显示 8、9、2、2 例存在肝内血管高密度影, 1 例因屏气不佳而于上述图像中均存在运动伪影致图像总体质量评分为 3, 其余图像总体质量评分均 $\geq 4$ 。各种图像总体质量及显示病灶清晰度评分差异均有统计学意义( $P$ 均 $< 0.001$ ); 其中 PC-VP 与 TNC 图像总体质量评分差异无统计学意义( $P > 0.05$ )且均高于 VNC-AP、PC-AP 及 VNC-VP ( $P$ 均 $< 0.05$ ); PC-AP、PC-VP 及 TNC 显示病灶清晰度评分差异均无统计学意义( $P$ 均 $> 0.05$ )且均高于 VNC-AP 及 VNC-VP ( $P$ 均 $< 0.05$ )。见表 1 及图 1、2。

表 1 TNC、VNC-AP、PC-AP、VNC-VP 及 PC-VP 图像主观评分比较( $n=50$ )

图像类别	总体质量	显示病灶清晰度
TNC	5(5,5)	5(5,5)
VNC-AP	4(4,4)	4(4,5)
PC-AP	5(4,5)	5(5,5)
VNC-VP	4(4,4)	4(4,5)
PC-VP	5(5,5)	5(5,5)
F 值	96.765	76.140
P 值	$< 0.001$	$< 0.001$

2.2 客观评价指标 2 名医师所测客观评价指标一致性良好( $ICC$  0.886~0.992)。TNC、VNC-AP、PC-AP、VNC-VP 及 PC-VP 图像客观评价指标总体差异均有统计学意义( $P$ 均 $< 0.001$ ); 基于 PC-VP 与 TNC 图所测肿瘤区域、邻近非瘤肠壁及皮下脂肪 CT 值差异均无统计学意义( $P$ 均 $> 0.05$ )。PC-AP 图肿瘤区域 CT 值低于 TNC、VNC-AP、VNC-VP 及 PC-VP 图( $P$ 均 $< 0.05$ ); PC-AP、PC-VP 图像邻近非瘤肠壁 CT 值低于 VNC-AP 及 VNC-VP 图( $P$ 均 $< 0.05$ ), PC-AP 及 VNC-AP 图邻近非瘤肠壁 CT 值与 TNC 图差异均有统计学意义( $P$ 均 $< 0.05$ ), 而 PC-VP 及 VNC-VP 图与二者差异均无统计学意义( $P$ 均 $> 0.05$ ); PC-AP 及 TNC 图肝脏 CT 值均低于 VNC-AP、VNC-VP 及 PC-VP 图( $P$ 均 $< 0.05$ ); VNC-AP 及 VNC-VP 图皮下脂肪 CT 值均高于 TNC、PC-AP 及 PC-VP 图( $P$ 均 $< 0.05$ ); 与 TNC 图相比, VNC-AP、PC-AP、VNC-VP 及 PC-VP 图椎旁肌/臀大肌 CT 值及腹主动脉 CT 值差异均有统计学意义( $P$ 均 $< 0.05$ ); VNC-AP 及 VNC-VP 图肿瘤及肝脏 CNR 均低于 TNC、PC-AP 及 PC-VP 图( $P$ 均 $< 0.05$ )。见表 2。

Bland-Altman 结果显示, 相比 TNC 图, 基于 VNC-AP、PC-AP、VNC-VP 及 PC-VP 图所测肿瘤区域、邻近非瘤肠壁及肝脏 CT 值平均差值均 $\leq 5.0$  HU, 差值在 LOA 界限外的点 $\leq 4\%$ ; 基于 PC-AP 所测椎旁肌/臀大

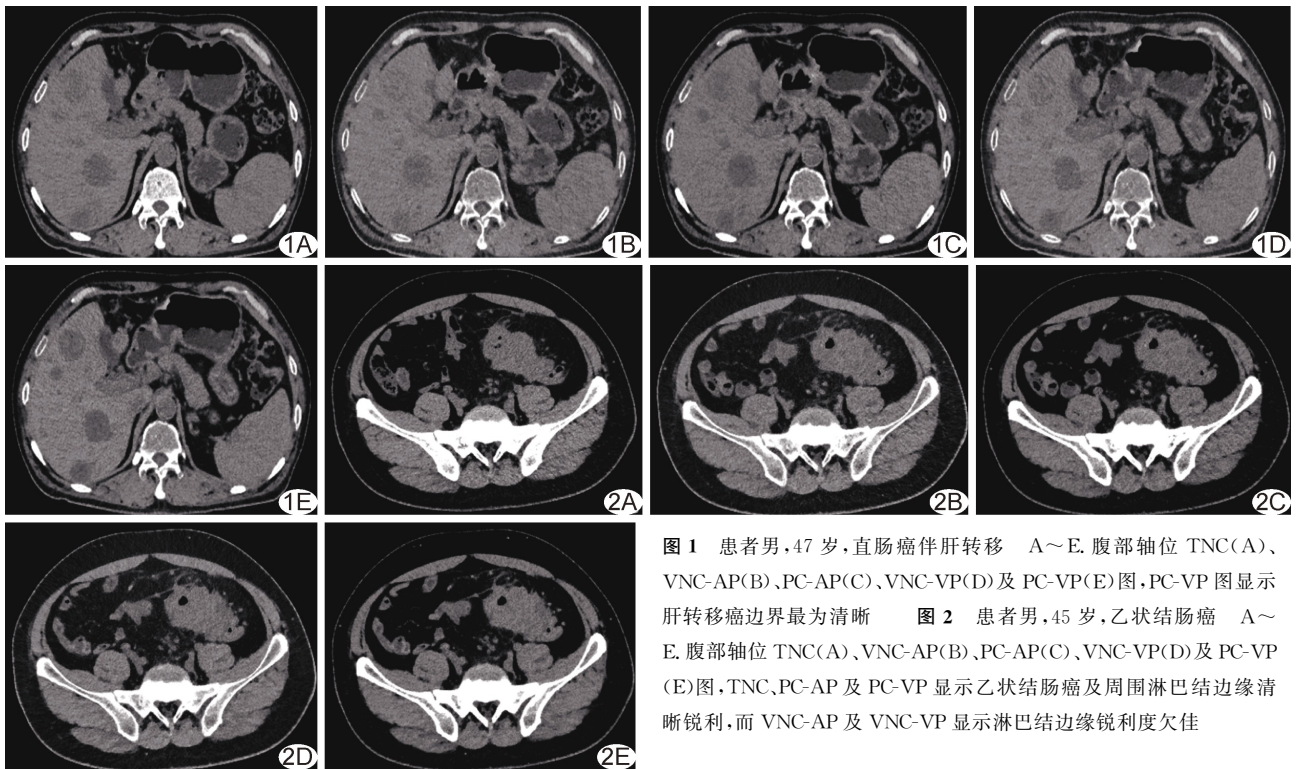


图 1 患者男, 47 岁, 直肠癌伴肝转移 A~E. 腹部轴位 TNC(A)、VNC-AP(B)、PC-AP(C)、VNC-VP(D)及 PC-VP(E)图, PC-VP 图显示肝转移癌边界最为清晰 图 2 患者男, 45 岁, 乙状结肠癌 A~E. 腹部轴位 TNC(A)、VNC-AP(B)、PC-AP(C)、VNC-VP(D)及 PC-VP(E)图, TNC、PC-AP 及 PC-VP 显示乙状结肠癌及周围淋巴结边缘清晰锐利, 而 VNC-AP 及 VNC-VP 显示淋巴结边缘锐利度欠佳

表 2 TNC、VNC-A、PC-A、VNC-V 及 PC-V 图客观评价指标比较(n=50)

图像类别	CT 值(HU)						CNR	
	肿瘤区域	邻近非瘤肠壁	椎旁肌/臀大肌	皮下脂肪	肝脏	腹主动脉	肿瘤	肝脏
TNC	43.98±4.47	40.00 (33.00,46.25)	48.66±4.09	-109.92±12.29	58.00 (54.50,60.25)	42.44±3.81	12.03±2.45	13.08 (11.18,14.69)
VNC-AP	43.00 (41.75,47.25)	43.12±7.34	52.00 (48.00,54.00)	-76.28±8.41	60.40±4.78	35.38±5.71	9.54±1.97	10.84±2.08
PC-AP	42.02±4.68	37.12±8.61	42.06±5.00	-121.00 (-125.25,-117.00)	52.88±6.29	35.40±5.77	11.43±2.89	12.17±2.93
VNC-VP	44.60±4.65	41.42±7.75	51.72±5.08	-76.86±7.76	59.82±5.25	36.00±4.47	9.43±1.72	10.62±1.91
PC-VP	43.98±5.15	39.30±8.52	44.44±5.15	-116.06±10.56	59.78±5.43	35.74±4.59	11.67±1.53	12.82±1.61
F 值	25.222	60.525	159.975	167.533	123.608	78.251	72.640	63.375
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

肌 CT 值与 TNC 平均差值为 6.6 HU,其余图像与 TNC 平均差值均≤5.0 HU,差值在 LOA 界限外的点≤6%;而 VNC-AP、PC-AP、VNC-VP 及 PC-VP 与基于 TNC 所测皮下脂肪及腹主动脉 CT 值平均差值均较大(皮下脂肪 6.1~33.6 HU、腹主动脉 6.4~7.1 HU)。

2.3 辐射剂量比较 相比平扫+双期增强扫描,双期增强扫描 DLP 及 ED 分别降低 38.94%[(781.28±177.98)mGy·cm vs. (1 279.60±292.24)mGy·cm]及 38.92%[(11.72±2.67)mSv vs. (19.19±4.38)mSv]。

### 3 讨论

PCCT 是近十年来 CT 成像领域的重大技术突破,能在降低胸部、腹部、骨骼肌肉及心血管等多个系统成像辐射剂量的同时提高诊断相关疾病准确率<sup>[5-8]</sup>;利用新型半导体探测器使每个光子能量均能被捕捉,空间分辨率更高、可获取多能量数据,并基于更高光谱分离技术进行多物质分离和降噪处理;新近研发的 PC 重建算法可将虚拟非碘图像与单能量图像相结合,在减少碘对比剂对图像干扰的同时确保清晰显示钙化,用于评估冠状动脉钙化积分、心外膜脂肪组织体积和密度等均优于 VNC<sup>[3,9]</sup>。

本研究结果显示,相比 VNC,PC 图中的皮下脂肪 CT 值更接近 TNC,可能与其物质分离及降噪处理更佳、能更好地还原真实图像,而 VNC 属于两物质分解模型(通常为碘和水),脂肪组织 X 线衰减属性与纯水或纯碘的线性组合不完全匹配<sup>[10-11]</sup>有关。既往研究<sup>[12]</sup>报道,基于 PC 与 VNC 鉴别肾上腺腺瘤与转移瘤效能相当。本研究 PC-VP 与 VNC-VP 肿瘤区域及肝脏 CT 值均无明显差异,推测其实质脏器及软组织成分 CT 值差

异不大。双能探测器 CT 需在后处理工作站重建获取 VNC 图像;相比而言,PCCT VNC 及 PC 算法均能在扫描中直接重建原始数据,更加高效、便捷。

本研究所获 VNC-AP、PC-AP、VNC-VP、PC-VP 图像均符合诊断要求(评分均≥3),其中 VNC-AP、PC-AP 图较 VNC-VP、PC-VP 更易出现肝内血管高密度影但不影响显示肝内病灶(显示病灶清晰度评分均≥4);其中,PC-AP、PC-VP 与 TNC 显示病灶清晰度评分差异均无统计学意义且均高于 VNC-AP 及 VNC-VP,考虑与 VNC 图中脂肪密度增高、致病灶对比度降低有关。

原发灶 CT 值及肝脏 CT 值均为评估结直肠癌肝转移的重要指标。本研究 Bland-Altman 结果显示,相比 TNC 图,基于 VNC-AP、PC-AP、VNC-VP 及 PC-VP 所测肿瘤区域、邻近非瘤肠壁及肝脏 CT 值平均差值均≤5.0 HU,提示 PCCT PC 与 VNC 算法代替常规 CT 平扫具有可行性。对于显示肝转移癌,PC-VP 优于 TNC、VNC-AP、PC-AP 及 VNC-VP,可能 VP 肝转移灶与周围组织对比度更好<sup>[13]</sup>,而抑碘技术主要针对图像灰度,使良好的对比度得以保留。本研究中,相比平扫+双期增强扫描,以 PC 及 VNC 替代常规平扫可使 ED 降低 38.92%。

综上所述,PCCT PC-VP 图更接近 TNC、ED 显著降低,可替代常规 CT 平扫评估结直肠癌及其肝转移。但本研究仅涉及单中心、样本量有限,仅对 AP 及 VP 数据进行重建,所选 PC 重建参数为 60 keV、较为固定;有待未来通过多中心研究进一步探索最佳重建方案。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:张乐乐研究设计和实施、数据分析、撰写和修改文章;朱丽娜研究设计、修改文章;聂可卉修

改文章;谷艳博和李莉明研究实施;高剑波指导、审阅文章。

### [参考文献]

- [1] 张艺腾,夏春潮,曾令明,等. 双能 CT 虚拟平扫技术临床应用及研究进展[J]. 中华放射学杂志, 2023, 57(4):441-446.
- [2] 刘文,张礼荣,石卉. Revolution CT 虚拟平扫在直肠癌诊断中的应用价值研究[J]. 现代医药卫生, 2023, 39(3):429-433.
- [3] HAAG N P, MICHAEL A E, LENNARTZ S, et al. Coronary artery calcium scoring using virtual versus true noncontrast images from photon-counting coronary CT angiography [J]. Radiology, 2024, 310(3):e230545.
- [4] MA G, HAN D, DANG S, et al. Replacing true unenhanced imaging in renal carcinoma with virtual unenhanced images in dual-energy spectral CT: A feasibility study [J]. Clin Radiol, 2021, 76(1):81. e21-81. e27.
- [5] FLOHR T, SCHMIDT B. Technical basics and clinical benefits of photoncounting CT[J]. Invest Radiol, 2023, 58(7):441-450.
- [6] RAJIAH P S, DUNNING C, RAJENDRAN K, et al. Highpitch multienergy coronary CT angiography in dualsource photoncounting detector CT scanner at low iodinated contrast dose[J]. Invest Radiol, 2023, 58(9):681-690.
- [7] JUNGBLUT L, ABEL F, NAKHOSTIN D, et al. Impact of photon counting detector CT derived virtual monoenergetic images and iodine maps on the diagnosis of pleural empyema[J]. Diagn Interv Imaging, 2023, 104(2):84-90.
- [8] SCHWARTZ F R, SAMEI E, MARIN D. Exploiting the potential of photoncounting CT in abdominal imaging[J]. Invest Radiol, 2023, 58(7):488-498.
- [9] CUI M, BAO S, LI J, et al. CT radiomic features reproducibility of virtual non-contrast series derived from photon-counting CCTA datasets using a novel calcium-preserving reconstruction algorithm compared with standard non-contrast series: Focusing on epicardial adipose tissue[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2024, 40(6):1257-1267.
- [10] 王境伟,周燕,苏国义,等. 双层探测器光谱 CT 虚拟平扫代替真实平扫评估甲状腺乳头状癌的可行性研究[J]. 中国临床医学影像杂志, 2023, 34(12):865-870.
- [11] 李君伟,庄霞梅,尹燕,等. 能谱 CT 虚拟平扫与真实平扫诊断儿童骨骼肌肿瘤或肿瘤样病变的对比研究[J]. 临床小儿外科杂志, 2024, 23(4):387-392.
- [12] BETTE S, RISCH F, CANALINI L, et al. Diagnostic performance of photon-counting detector CT for differentiation between adrenal adenomas and metastases [J]. Eur Radiol, 2024, 34(9):5944-5953.
- [13] 顾芳燕,朱晓梅,裴芳,等. 肝脏占位病变能谱 CT 成像中不同期相虚拟平扫替代真实平扫的效能及方案选择[J]. 中国医学影像学杂志, 2024, 32(8):809-815.