

· 论著 ·

能谱 CT 多材料分离技术重建虚拟平扫 对儿童肝肿瘤的诊断价值



全文二维码

魏伟安¹ 易婷¹ 杨吉钱¹ 陈雁² 金科¹¹ 中南大学湘雅医学院附属儿童医院(湖南省儿童医院)放射科,长沙 410007; ² 株洲市二医院放射科,株洲 412000

通信作者:金科,Email:jinke001@sina.com

【摘要】 目的 探讨能谱 CT 虚拟平扫(virtual unenhance, VUE)技术对儿童肝肿瘤的诊断价值。

方法 回顾性分析 2021 年 1 月至 2022 年 12 月于湖南省儿童医院确诊的 96 例肝肿瘤患儿能谱 CT 扫描结果,分别重建真实平扫(true unenhance, TUE)、动脉期虚拟平扫(virtual unenhanced artery, VUEa)和门脉期虚拟平扫(virtual unenhanced portal vein, VUEpv)图像。图像质量客观评价参数包括肝实质、肝肿瘤、右侧竖脊肌 3 个部位的 CT 值、信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)、肝肿瘤对比噪声比(contrast-to-noise ratio, CNR)以及背景噪声(standard deviation, SD)。采用随机区组方差分析和 Friedman 秩和检验比较 TUE、VUEa 和 VUEpv 图像质量客观参数和主观评分的差异。分析三组图像 CT 值的相关性与一致性,采用 χ^2 检验比较肝肿瘤和钙化灶的检测能力。**结果** VUE 与 TUE 图像的肝实质 CT 值、肝肿瘤 CNR 值差异均无统计学意义($P > 0.05$)。VUE 的图像背景噪声 SD 值均低于 TUE, VUE 的肝实质 SNR 值、肝肿瘤 CT 值和 SNR 值、右侧竖脊肌 CT 值和 SNR 值均高于 TUE, 差异均有统计学意义($P < 0.001$)。VUEa、VUEpv 分别与 TUE 图像的 CT 值相关性较高(肝实质: $r = 0.816, 0.797, P_{\text{均}} < 0.001$; 肝肿瘤: $r = 0.769, 0.839, P < 0.001$; 右侧竖脊肌: $r = 0.664, 0.687, P < 0.001$)。除肝肿瘤外,其他组织 CT 值的临床诊断一致性界限为 10 HU 时,界外数据点占比均 $< 5\%$ 。VUEpv 肝肿瘤的主观评分和检出率均高于 VUEa, 差异具有统计学意义($P < 0.05$),但与 TUE 的差异无统计学意义($P > 0.05$)。而 VUEa 和 VUEpv 的钙化灶检出率明显低于 TUE, 差异有统计学意义($P < 0.001$)。三期 CT 扫描剂量 DLP 总计为 513.94 (375.00, 652.86) mGy, TUE 的 DLP 占总 DLP 的 30.14%。**结论** 多材料分离(multi-material decomposition, MMD)技术重建的 VUEpv 图像质量、病灶检测能力均优于 VUEa, 可明显降低长期肝肿瘤患儿 CT 随访的辐射剂量,但仍不能完全替代 TUE 图像的临床价值。

【关键词】 光电子光谱法; 肝肿瘤; 外科手术; 儿童

基金项目:湖南省卫生健康委科研计划项目(D202309016291); 湖南省卫生健康委科研计划项目(C202309018652)

DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202312053-011

Application of virtual unenhanced images generated using multimaterial decomposition technology from dual-energy CT in pediatric CT with liver tumors

Wei Weian¹, Yi Ting¹, Yang Jiqian¹, Chen Yan², Jin Ke¹

¹ Department of Radiology, Affiliated Children's Hospital of Xiangya School of Medicine, Central South University (Hunan Children's Hospital), Changsha 410007, China; ² Department of Radiology, Zhuzhou Second's Hospital, Zhuzhou 412000, China

Corresponding author: Jin Ke, Email:jinke001@sina.com

【Abstract】 Objective To explore the diagnostic value of virtual unenhanced (VUE) technique using dual-energy CT for pediatric liver tumors. **Methods** The energy spectrum CT images were retrospectively reviewed for children with liver tumors or liver metastases diagnosed at Hunan Children's Hospital from January 2021 to 2022. True unenhance (TUE), virtual unenhanced arterial phase (VUEa) and virtual unenhanced portal venous phase (VUEpv) images were separately reconstructed. Objective evaluation parameters of image quality included CT values of liver parenchyma, liver tumors, right vertical spinal muscles, signal-to-noise ratio

(SNR), contrast-to-noise ratio (CNR) of liver tumors and background noise (SD). Randomized block variance analysis and Friedman rank sum test were utilized for comparing the differences in image quality and lesion display scores among TUE, VUEa and VUEpv. The correlation of CT values among three groups was analyzed and Bland-Altman plots were generated for illustrating the agreement between VUE and TUE CT value measurements. Chi-square test was utilized for comparing the detection capabilities for liver tumors and calcifications.

Results No significant difference existed in CT values of liver parenchyma and CNR of liver tumors between TUE and VUE groups ($P > 0.05$). SD values of background noise in VUE were lower than those in TUE and SNR of liver parenchyma and liver tumor and right erector spinae muscle. And CT values of liver tumors and right erector spinae muscles in VUE were all significantly higher than those in TUE ($P < 0.001$). The correlation of CT values between VUEa, VUEpv and TUE images was relatively high (liver parenchyma: $r = 0.816, 0.797, P < 0.001$ for both), (liver tumor: $r = 0.769, 0.839, P < 0.001$ for both), (right paraspinal muscle: $r = 0.664, 0.687, P < 0.001$ for both). Bland-Altman scatter plot indicated that the proportion of data points outside the limits of agreement was less than 5% when clinical diagnostic threshold was set at 10HU for tissues other than liver tumors. Subjective display scores and detection rates of lesions on VUEpv were both higher than those of VUEa ($P < 0.05$). And there were no differences with TUE ($P > 0.05$). However, detection rate of calcifications for both VUEpv and VUEa were significant lower than TUE ($P < 0.001$). Total DLP of three phase CT scan was 513.94(375.00, 652.86) mGy with DLP from TUE phase representing 30.13% of overall DLP. **Conclusions** For children with liver tumors requiring long-term CT follow-ups, VUEpv image reconstructing using multi-material decomposition (MMD) technique offers better capabilities of image quality and lesion detection as compared to VUEa. It may significantly lower radiation dose in children with liver tumors requiring long-term CT follow-ups. However, it still cannot completely replace clinical value of TUE images.

【Key words】 Photoelectron Spectroscopy; Liver Neoplasms; Surgical Procedures, Operative; Child

Fund program: Scientific Research Project of Hunan Provincial Health Commission (D202309016291); Scientific Research Project of Hunan Provincial Health Commission (C202309018652)

DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202312053-011

肝肿瘤占儿童实体肿瘤的 2%~3%, 多数被诊断为恶性肿瘤, 其临床治疗后的随访需通过多次 CT 扫描进行动态评估, 而 CT 辐射对儿童的生长发育影响巨大^[1-2]。常规通过降低管电压和管电流等方式实现低剂量 CT 扫描策略, 但过低的辐射剂量会大幅降低图像的诊断质量。而虚拟平扫(virtual unenhanced, VUE)则通过基物质分离识别并去除增强 CT 图像中的碘物质, 重建和生成不含碘物质的 CT 图像, 类似常规的真实平扫(true unenhanced, TUE)图像。因此可以通过替代 TUE 实现减少一次 CT 扫描的策略, 从而能在不影响图像质量的前提下大幅降低 CT 的辐射剂量。目前, 一项涉及不同厂家 CT 扫描仪的纵向研究显示, VUE 图像上测量的 CT 值具有较高的可重复性, 但关于 VUE 与 TUE 图像的 CT 值一致性仍具有较大的分歧^[3-5]。以往的物质去碘(material suppress iodine, MSI)图只是单纯地将 CT 增强图像中的碘物质识别并去除, 重建后的图像与 TUE 图像的组织成分存在一定差异, 导致其在临床实践中仍存在一定的不足^[6-7]。近期, VUE 通过多材料分离(multi-material decomposition, MMD)技

术将增强 CT 图像的碘物质替换成同等体积的血液物质, 重建出更加接近于 TUE 组织成分的图像^[8]。然而, 关于 MMD 技术重建 VUE 图像的相关研究较少, 并且大多局限于正常解剖结构的图像质量对比分析, 缺乏临床实践的应用。因此, 本研究回顾性分析肝肿瘤患儿的增强能谱 CT 图像, 旨在通过对图像质量、CT 值测量一致性以及病灶检出等方面进行评估, 探讨通过 MMD 技术重建的 VUE 图像在儿童肝肿瘤诊断中的可行性。

资料与方法

一、一般资料

回顾性分析 2021 年 1 月至 2022 年 12 月湖南省儿童医院确诊的肝肿瘤或肝转移瘤患儿的能谱 CT 图像。纳入标准: 完成常规平扫、动脉期和门静脉期三期能谱 CT 扫描。排除标准: ①囊性、液性肝肿瘤; ②肝脏基础疾病(脂肪变性、酒精肝、肝硬化等); ③临床资料或影像资料不完整。共收集 96 例肝肿瘤患儿, 男 59 例、女 37 例, 年龄 2.54(0.66, 6.91) 岁。

其中富血供病灶 41 例,包括肝母细胞瘤 2 例、血管瘤 20 例、血管内皮细胞瘤 10 例、局灶性结节增生 9 例;非富血供病灶 55 例,包括肝母细胞瘤 36 例、错构瘤 8 例、神经母细胞瘤肝转移 7 例、淋巴瘤 4 例。本研究通过湖南省儿童医院伦理委员会审批通过(HCHLL-2023-86),患儿家属均知情同意。

二、CT 扫描及注射方案

患儿 CT 检查均在美国 GE Revolution CT 扫描仪下进行,待患儿自然平静或口服水合氯醛(0.2 mL/kg)镇静后,采用头部先进入的仰卧位,扫描范围从纵膈顶至髂前上棘连线或耻骨联合水平,采用螺旋扫描模式,探测器宽度为 80 mm。平扫期的管电压 120 kVp,动脉和门静脉期采用瞬时切换管电压 80/140 kVp。三期扫描管电流均采用自动智能毫安(100~400 mAs)。CT 增强使用非离子型等渗对比剂碘克沙醇(320 mg/mL),用量根据患儿年龄和体重综合计算(1.0~1.8 mL/kg),采用双筒高压注射器(Ulrich, Germany)以 1~3 mL/s 速率经静脉注射,注射完成后 3~5 s 和 20~25 s 分别进行动脉期和门静脉期扫描。根据原始图像生成层厚和层间距均为 2.5 mm 的重建图像,并分别得到虚拟平扫动脉期(virtual unenhanced artery, VUEa)和虚拟平扫门静脉期(virtual unenhanced portal vein, VUEpv)图像。同时记录患儿各期 CT 扫描的 CT 容积剂量指数(CT dose index volume, CTDI vol)和剂量长度乘积(dose length product, DLP)。

三、图像评估

1. 客观评估:将 TUE、VUEa 和 VUEpv 三组图像传至 AW 4.7 后处理工作站进行分析,数据均由同一放射科主管技师在横断面上进行测量记录。选择肝门层面,在右侧竖脊肌、肝左叶和肝右叶 3 个区域勾画感兴趣区域(region of interest, ROI),选择肝肿瘤的最大显示层面(多发病灶取体积最大者进行测量),避开血管、坏死等区域,选择实性区域勾画 ROI,测量 CT 值和标准差(standard deviation, SD)。取肝左、右叶的平均值作为肝实质的最终测量结果,并以右侧竖脊肌 SD 值作为图像背景噪声。计算各 ROI 的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR), $SNR = CT \text{ 值} / SD \text{ 值}$;计算肝肿瘤的对比噪声比(contrast-to-noise ratio, CNR), $CNR \text{ 肝肿瘤} = (CT \text{ 肝实质} - CT \text{ 肝肿瘤}) / [0.5 \times (SD \text{ 肝实质} + SD \text{ 肝肿瘤})]$ 。根据肝动脉期肿瘤的不同强化程度进行量化评估。其中,富血供病灶为动脉期的肝肿瘤实性强化的 CT 值明显高于正常肝实质,非富血供病灶为动脉期的

肝肿瘤实性强化的 CT 值接近或低于正常肝实质^[9]。

2. 主观评分:由 2 名儿科影像副主任医师根据测量的肝肿瘤显示程度进行 4 分法评分。评分标准:1 分,病灶无法显示,不可诊断;2 分,病灶可疑显示,诊断不明确;3 分,病灶部分边界不清,不影响诊断;4 分,病灶边界清晰,诊断明确。取 2 名医师的平均分作为最终评分。

3. 检测能力:①病灶检测:将患儿平扫、动脉和门脉期三期 CT 扫描图像上检测到的所有肝肿瘤数量作为总数。由 1 名不知晓患儿个人信息及其影像信息的儿科影像副主任医师对 TUE、VUEa 和 VUEpv 三组图像分别进行独立阅片,记录各图片上检出的肝肿瘤数量。②钙化灶检测:将 TUE 图像上检测到的病灶内钙化灶数量作为钙化灶总数,由 1 名不知晓患儿个人信息及其影像信息的儿科影像主治医师对 VUEa 和 VUEpv 两组图像进行分别阅片,记录钙化灶数量。为消除偏倚,对不同组别的图像分别间隔一周进行单独阅片。

四、统计学处理

采用 SPSS 25.0 进行数据分析。服从正态分布的计量资料用 $\bar{x} \pm s$ 表示,不服从正态分布的计量资料采用 $M(Q_1, Q_3)$ 表示。三组图像的 CT、SD、SNR 和 CNR 比较采用随机区组方差分析,组内两两比较采用 Bonferroni 检验。分析 VUE 与 TUE 的 CT 值的相关性与一致性,以 TUE 作为标准 CT 值,分析两者间的差值,设置统计学一致性界限(limits of agreement, LOA)为差值均值 $\pm 1.96 \text{ SD}$,临床诊断 LOA 为差值均值 $\pm 10 \text{ HU}^{[10]}$ 。采用 Kappa 检验评价 2 名医师病灶显示评分结果的一致性,主观评分和辐射剂量的比较采用 Friedman 秩和检验,组内两两比较采用 Mann-Whitney U 检验。肝肿瘤和钙化灶总数结果比较采用 χ^2 检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

一、辐射剂量

CT 平扫 CTDI vol 为 5.43(3.45, 6.52) mGy, DLP 为 154.90(106.82, 229.86) mGy·cm。动脉期 CTDI vol 为 5.58(5.58, 5.58) mGy, DLP 为 178.40(138.40, 227.18) mGy·cm。门脉期 CTDI vol 为 5.58(5.58, 5.58) mGy, DLP 为 178.14(134.11, 227.18) mGy·cm。三组间的 DLP 差异无统计学意

义($\chi^2=2.967, P=0.227$),三期 CT 扫描总 DLP 为 513.94(375.00,652.86)mGy,其中 TUE 的 DLP 占总 DLP 的 30.14%。

二、客观评估

三组的肝实质 CT 值差异无统计学意义($P>0.05$)。肝肿瘤和右侧竖脊肌的 CT 值显示 VUEa 与 VUEpv 之间的差异无统计学意义($P>0.05$),但均高于 TUE,差异有统计学意义($P<0.05$)。肝实质、肝肿瘤和右侧竖脊肌的 SNR 均显示 VUEpv 高于 TUE 和 VUEa,VUEa 高于 TUE,差异有统计学意义($P<0.05$)。图像背景噪声 SD 值显示 VUEa 和 VUEpv 两者差异无统计学意义($P>0.05$),但均低于 TUE,差异有统计学意义($P<0.05$)。VUEpv 的肝肿瘤 CNR 值高于 VUEa,差异有统计学意义($P<0.05$)。见表 1。

VUEa、VUEpv 与 TUE 的肝实质 CT 值($r=0.816,0.797, P<0.001$)、肝肿瘤 CT 值($r=0.769,0.839, P<0.001$)、右侧竖脊肌 CT 值($r=0.664,0.687, P<0.001$)均具有较强的相关性;VUEa、VUEpv 与 TUE 的肝实质、肝肿瘤和右侧竖脊肌的差值在统计学 LOA 外数据点占比均 $<10\%$ 。VUEa 和 VUEpv 与 TUE 的肝实质、右侧竖脊肌的差值在临床诊断 LOA 为 10HU 时界外数据点占比均 $<5\%$,而肝肿瘤的差值占比分别为 18.75% 和 13.54%。

两期 VUE 图像的富血供和非富血供病灶的 CT 值、SNR 值均高于 TUE,差异有统计学意义($P<0.05$)。富血供病灶的 CNR 值高于 VUEa,差异有统计学意义($P<0.05$)。而非富血供病灶的 CNR 值在三组图像之间的差异无统计学意义($P>0.05$),见表 2。VUEa、VUEpv 分别与 TUE 的富血供病灶 CT 值($r=0.673,0.807, P<0.001$)、非富血供病灶的 CT 值($r=0.834,0.835, P<0.001$)具有较强的相关性;VUEa 和 VUEpv 与 TUE 的富血供病灶的 CT 值差值在临床诊断 LOA 为 10 HU 时界外数据点

占比分别为 12.5% 和 7.29%,而非血供病灶的 CT 差值占比均为 6.25%。见图 1。

三、图像质量主观评分

2 名医师对 TUE、VUEa 和 VUEpv 的主观评分一致性均较高(Kappa = 0.872、0.777、0.842),TUE 与 VUEpv 的主观评分差异无统计学意义($P>0.05$)。其中,富血供病灶的 VUEpv 的主观评分高于 VUEa,而非富血供病灶的 TUE 与 VUEpv 的主观评分均高于 VUEa。见表 3。

三期 CT 扫描总共发现 245 个肝肿瘤,包括 91 个富血供病灶和 154 个非富血供病灶。肝肿瘤检出率为 VUEpv 86.1%(211/245)、TUE 80.8%(198/245) 和 VUEa 75.9%(186/245),其中 VUEpv 高于 VUEa($P=0.004$)。富血供病灶检出率为 TUE 89.0%(81/91)、VUEa 86.8%(79/91) 和 VUEpv 82.4%(75/91),差异无统计学意义($P=0.425$)。非富血供病灶检出率为 VUEpv 88.3%(136/154),均高于 TUE 76%(117/154) 和 VUEa 69.5%(107/154)($P<0.001$);见图 1。以 TUE 检测到 45 个钙化灶作为总数,VUEa 和 VUEpv 的钙化灶检出率分别为 62.2%(28/45) 和 68.8%(31/45),差异有统计学意义($P<0.001$)。

讨 论

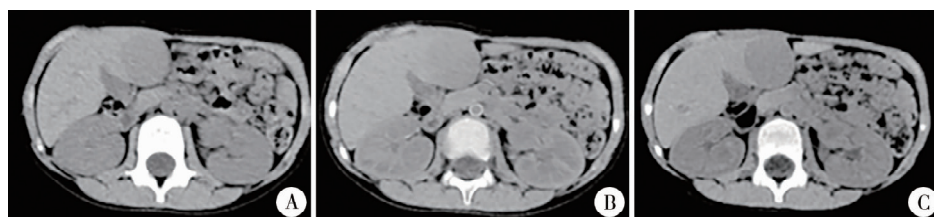
相比超声和磁共振检查,CT 扫描仪成像速度更快,同时通过重建薄层 CT 图像便于发现细小病灶。因此,临床上常需采用多次 CT 扫描对肝肿瘤患儿的术前、术后及随访状况进行动态评估,但大量 CT 辐射剂量的积累会严重损害儿童的身心健康,如何、有效长期地降低儿童肝肿瘤的 CT 辐射剂量成为困扰医护人员的难题。目前,VUE 图像可采用 MMD 技术进行重建,通过模拟的血液物质替代 CT 增强图像中的碘物质,相比于单纯地去除增强 CT

表 1 儿童肝肿瘤 CT 的 VUE 与 TUE 图像质量客观参数比较($\bar{x} \pm s, n=96$)

Table 1 Comparison of objective image quality parameters between VUE and TUE for pediatric liver tumor CT scans($\bar{x} \pm s, n=96$)

CT 扫描方式	CT			SNR			CNR	图像背景噪声
	肝实质	肝肿瘤	右侧竖脊肌	肝实质	肝肿瘤	右侧竖脊肌		
TUE	63.44 ± 6.36	42.51 ± 8.55 ^{ab}	55.23 ± 4.30 ^{ab}	9.20 ± 2.13 ^{ab}	5.96 ± 1.82 ^{ab}	8.36 ± 2.48 ^{ab}	2.99 ± 1.61	7.11 ± 1.92 ^{ab}
VUEa	63.78 ± 6.29	48.33 ± 8.71	56.17 ± 5.27	12.98 ± 3.77 ^b	8.26 ± 3.23 ^b	11.02 ± 3.24 ^b	2.71 ± 1.66 ^b	5.45 ± 1.37
VUEpv	64.14 ± 6.49	47.54 ± 8.64	56.97 ± 5.84	14.39 ± 3.68	9.12 ± 4.60	11.89 ± 4.07	3.21 ± 1.71	5.25 ± 1.55
F 值	2.006	80.887	10.431	160.778	56.107	75.007	8.450	87.138
P 值	0.137	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注 TUE:真实平扫; VUEa:虚拟平扫动脉期; VUEpv:虚拟平扫门静脉期; SNR:信噪比; CNR 对比噪声比; ^a:与 VUEa 比较,差异有统计学意义; ^b:与 VUEpv 比较,差异有统计学意义



注 TUE:真实平扫; VUEa:虚拟平扫动脉期; VUEpv:虚拟平扫门静脉期; A:TUE,肝左内叶病灶边界清晰,肝右叶下段病灶显示模糊; B:VUEa,肝左内叶病灶边界模糊,肝右叶下段病灶未显示; C:VUEpv,肝内多发灶边界清晰,肝右叶下段病灶内可见血管穿梭征

图1 1例4岁女性肝内多发淋巴瘤患儿的TUE、VUEa与VUEpv图

Fig.1 TUE(A),VUEa(B) and VUEpv(C) image of a 4-year-old girl with multiple hepatic lymphomas

表2 肝肿瘤的富血供病灶与非富血供病灶的图像质量客观参数比较($\bar{x} \pm s$)

Table 2 Comparison of objective image quality parameters between hypervascular and non-hypervascular liver tumor lesions($\bar{x} \pm s$)

CT 扫描方式	富血供病灶($n=41$)			非富血供病灶($n=55$)		
	CT	SNR	CNR	CT	SNR	CNR
TUE	45.49 ± 9.18 ^{ab}	6.83 ± 2.08 ^{ab}	2.75 ± 1.64 ^a	40.29 ± 7.37 ^{ab}	5.31 ± 1.28 ^{ab}	3.17 ± 1.58
VUEa	52.85 ± 9.10	9.59 ± 3.68	2.14 ± 1.70 ^b	44.97 ± 6.68	7.27 ± 2.44	3.14 ± 1.50
VUEpv	50.76 ± 9.48	11.05 ± 5.93	2.87 ± 1.61	45.13 ± 7.14	7.69 ± 2.51	3.46 ± 1.76
F 值	33.199	22.356	6.856	61.630	61.956	3.336
P 值	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	<0.001	0.039

注 TUE:真实平扫; VUEa:虚拟平扫动脉期; VUEpv:虚拟平扫门静脉期; SNR:信噪比; CNR 对比噪声比; ^a:与 VUEa 比较,差异有统计学意义; ^b:与 VUEpv 比较,差异有统计学意义

表3 肝肿瘤 CT 三组图像质量主观评分比较[$M(Q_1, Q_3)$]

Table 3 Comparison of subjective image quality in three groups of liver tumor CT scans[$M(Q_1, Q_3)$]

肝肿瘤	例数	TUE	VUEa	VUEpv	H 值	P 值
富血供	41	4(3,4)	3(3,4) ^b	4(3,4)	11.937	0.003
非富血供	55	4(3,4) ^a	3(3,3) ^b	4(3.5,4)	55.698	<0.001
总计	96	4(3,4) ^a	3(3,4) ^b	4(3.5,4)	63.239	<0.001

注 TUE:真实平扫; VUEa:虚拟平扫动脉期; VUEpv:虚拟平扫门静脉期; ^a:与 VUEa 比较,差异有统计学意义; ^b:与 VUEpv 比较,差异有统计学意义

图像的碘物质而形成的 MSI 图像,VUE 图像更加进一步接近还原 TUE 图像的物质组成成分,因此具备替代 TUE 图像的可行性,从而达到减少 CT 扫描次数的目的。多项研究表明 VUE 图像质量高于 MSI 图像,其中通过静脉期重建的 VUE 图像的正常组织 CT 值更接近 TUE 图像^[6,11]。本研究探讨通过 MMD 技术重建的 VUE 图像在肝肿瘤患儿中的临床应用价值,发现在门脉期重建的 VUEpv 图像比动脉期重建的 VUEa 图像具有更高的图像质量和肝肿瘤检出能力。

本次研究显示能谱 CT 增强扫描与 CT 常规平扫的辐射剂量相当,但 VUEa、VUEpv 的图像背景噪声 SD 值均显著小于 TUE,肝实质、肿瘤和右侧竖脊肌的 SNR 显著高于 TUE,VUEpv 与 TUE 的肝肿瘤 CNR 对比无差异但高于 VUEa。这与 Xiao 等^[12]通过 MMD 技术重建肾脏 VUE 图像的回顾性分析结

论相一致,同时发现排泄期 VUE 图像肾盂输尿管内的碘未完全去除,图像质量远不如皮髓质期 VUE 图像。肝脏约 70% 血供来自门静脉,表现为肝肿瘤患儿 CT 增强扫描门脉期的肝实质强化程度较动脉期均匀,因此通过 MMD 重建后的 VUEpv 图像的肝实质 SNR 值最佳,可以更好地显示一些隐匿性病灶。Kaza 等^[13]的研究亦提示,VUE 与 TUE 测量的正常解剖组织的 CT 值均无差异且相关性较高,但研究对象的数量偏少。本研究通过对 96 例肝肿瘤患儿 VUE 与 TUE 的肝实质和右侧竖脊肌 CT 值测量分析亦得到相近的结论。同时,通过 Bland-altman 散点图进一步分析显示,VUE 与 TUE 图像上正常解剖结构 CT 值测量差值超过统计学 LOA 外数量点占比均小于 10%,而差值超过临床诊断 LOA 外数量点占比均小于 5%,差值占比均优于之前成人患者正常解剖能谱 CT 的相关研究^[14-15]。这可能是因为

本研究纳入的是肝肿瘤患儿,同时排除了肝脏弥漫性病灶患儿,因此部分结论可能存在一定的差异性。

以往的多项研究证实 VUE 图像对脂肪和囊肿的 CT 值测量存在较大差异,因此本次研究仅针对肝肿瘤的实性成分进行分析,避免一些已知的潜在干扰^[4,7,16-18]。结果显示 VUEa、VUEpv 的肝肿瘤 CT 值均明显高于 TUE,同时差值 ≥ 10 HU 的数量点占比均大于 10%,其中以富血供病灶的数量居多。进一步研究发现富血供病灶的 VUEa 图像 CT 值差异性最大且相关性最低,这可能与动脉期图像的富血供病灶内碘浓度含量较高有关,通过 MMD 技术未能完全将动脉期富血供病灶内的碘物质完全分离,残留的碘对比剂导致 VUEa 图像病灶的 CT 值增高^[3,19]。而对于碘浓度含量相对较低的非富血供病灶,其 VUE 和 TUE 测量的 CT 值相关性更高。一项关于肾细胞癌的能谱 CT 研究证实两组图像的 CT 值相关性较好,并且病灶直径测量对比差异无统计学意义^[20]。

Meyer 等^[21]认为 VUE 图像虽然降低了 CT 增强特征的诊断性能,但仍可以准确地显示肾脏病灶性质。本文中肝肿瘤主观评分与检测能力提示 VUEpv 与 TUE 图像相当且均优于 VUEa 图像,与 Lacroix 等^[11]研究结果一致,他们通过研究成人肝脏病灶的能谱 CT 检查结果发现 VUEpv 的病灶显示能力和检测能力最高,其中以非富血供病灶最为明显。我们的研究结果也显示 VUEpv 与 TUE 图像的肝肿瘤的 CNR 值、主观评分和检测能力相当且优于 VUEa 图像。其中三组图像的非富血供病灶 CNR 值无差异,而 VUEa 图像的富血供病灶 CNR 值最低,这可能是因为本次研究的富血供病灶多为儿童常见的血管瘤,动脉期病灶血供丰富导致碘浓度含量明显增多,重建后的 VUEa 图像仍残留较多的碘物质导致 CT 值轻微增高,同时与肝实质的分界不如非富血供病灶清晰而进一步降低了其检出率。而 VUE 图像的钙化灶检出率的降低主要与小钙化的消失或钙化灶的体积缩小有关,Xiao 等^[12]研究显示 VUE 图像上识别能够无差异地识别直径为 3 mm 以上的结石,而直径低于 3 mm 以下的结石检出敏感性明显降低。这些可能与部分小钙化灶被误识别为碘而抑制、碘未完全分离导致局部密度增高遮掩钙化灶、VUE 重建算法的平滑处理等因素相关^[12,20]。另外,本研究中 VUEa 图像病灶内的钙化灶假阳性率增多,大多因富血供病灶内的血管碘物质分离不彻底所致,但随着强化时间的推移,VUEpv

图像病灶内的钙化灶假阳性率明显降低。

本研究存在一定局限性。第一,本研究是单中心的回顾性研究。第二,患儿年龄跨度大,因此采用个性化 CT 扫描,对比剂用量、扫描参数和扫描期相未能统一。第三,客观测量参数仅针对同一患儿体积最大的肝肿瘤,未对所有病灶进行定量、定性分析。第四,对不同的病灶大小未进行分层研究,未来需增加病种类型数量,并根据不同病种的 VUE 图像进行逐一分析。而在 VUE 的钙化灶检出应用中,不同尺寸的钙化灶检出率不同。第五,应扩大病灶的研究范围,根据脂肪变性、肝硬化等基础肝脏疾病进行亚组分析。

综上所述,能谱 CT 采用 MMD 技术重建的 VUEpv 图像与常规平扫相比,具有较好的 CT 值相关性和病灶检测能力,其肝肿瘤 CT 值、钙化灶显示差异性较 VUEa 小,其中非富血供病灶图像质量优于富血供病灶,可进一步降低肝肿瘤患儿长期 CT 随访的辐射剂量,但仍不能完全替代 TUE 图像的临床价值。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

作者贡献声明 魏伟安负责研究的设计、实施和起草文章;易婷,杨吉钱、陈雁进行病例数据收集与分析;金科负责研究设计与酝酿,并对文章知识性内容进行审阅

参 考 文 献

- [1] 王焕民. 重视安全与历练,提高小儿肝胆肿瘤诊治水平[J]. 临床小儿外科杂志,2023,22(12):1101-1103. DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202310061-001.
Wang HM. Further improving the diagnoses and treatments of pediatric hepatobiliary tumors[J]. J Clin Ped Sur,2023,22(12):1101-1103. DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202310061-001.
- [2] 儿童肝母细胞瘤诊疗规范(2019 年版)编写审定专家组. 儿童肝母细胞瘤诊疗规范(2019 年版)[J]. 临床肝胆病杂志,2019,35(11):2431-2434. DOI:10.3969/j.issn.1001-5256.2019.11.008.
Compilation and Examination Expert Group for Guidelines for the Diagnosis and Treatment of Hepatoblastoma (2019). Guidelines for the diagnosis and treatment of hepatoblastoma (2019)[J]. J Clin Hepatol,2019,35(11):2431-2434. DOI:10.3969/j.issn.1001-5256.2019.11.008.
- [3] Lennartz S, Parakh A, Cao JJ, et al. Longitudinal reproducibility of attenuation measurements on virtual unenhanced images: multivendor dual-energy CT evaluation[J]. Eur Radiol, 2021, 31(12):9240-9249. DOI:10.1007/s00330-021-08083-6.
- [4] Jamali S, Michoux N, Coche E, et al. Virtual unenhanced phase with spectral dual-energy CT: Is it an alternative to conventional true unenhanced phase for abdominal tissues? [J]. Diagn Interv Imaging,2019,100(9):503-511. DOI:10.1016/j.diii.2019.04.007.
- [5] Zhou J, Zhou Y, Hu H, et al. Feasibility study of using virtual non-contrast images derived from dual-energy CT to replace true

- non-contrast images in patients diagnosed with papillary thyroid carcinoma[J]. J Xray Sci Technol, 2021, 29 (4): 711-720. DOI:10.3233/XST-210884.
- [6] 王会霞,岳松伟,吕培杰,等. 对比分析两种胸部能谱 CT 虚拟平扫图像与常规平扫图像[J]. 中国医学影像技术, 2019, 35(9):1409-1413. DOI:10.13929/j.1003-3289.201812006. Wang HX, Yue SW, Lyu PJ, et al. Comparative analysis of two kinds of virtual unenhanced technique of spectral CT and routine plain CT in thorax[J]. Chin J Med Imaging Technol, 2019, 35(9):1409-1413. DOI:10.13929/j.1003-3289.201812006.
- [7] 杨亮,罗德红,赵燕凤,等. 头颈部肿瘤检查中能谱 CT 虚拟平扫替代常规平扫的可行性研究[J]. 中华放射学杂志, 2015, 49(8):572-576. DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2015.08.003. Yang L, Luo DH, Zhao YF, et al. Feasibility study on application of gemstone spectral CT material suppressed Iodine as virtual non-contrast CT scan in head and neck neoplasms[J]. Chin J Radiol, 2015, 49(8):572-576. DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2015.08.003.
- [8] Mendonca PRS, Lamb P, Sahani DV. A flexible method for multi-material decomposition of dual-energy CT images[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2014, 33(1):99-116. DOI:10.1109/TMI.2013.2281719.
- [9] Tang A, Bashir MR, Corwin MT, et al. Evidence supporting LI-RADS major features for CT-and MR imaging-based diagnosis of hepatocellular carcinoma: a systematic review[J]. Radiology, 2018, 286(1):29-48. DOI:10.1148/radiol.2017170554.
- [10] Javadi S, Elsherif S, Bhosale P, et al. Quantitative attenuation accuracy of virtual non-enhanced imaging compared to that of true non-enhanced imaging on dual-source dual-energy CT[J]. Abdom Radiol (NY), 2020, 45(4):1100-1109. DOI:10.1007/s00261-020-02415-8.
- [11] Lacroix M, Mulé S, Herin E, et al. Virtual unenhanced imaging of the liver derived from 160-mm rapid-switching dual-energy CT (rsDECT): comparison of the accuracy of attenuation values and solid liver lesion conspicuity with native unenhanced images[J]. Eur J Radiol, 2020, 133:109387. DOI:10.1016/j.ejrad.2020.109387.
- [12] Xiao JM, Hippe DS, Zecevic M, et al. Virtual unenhanced dual-energy CT images obtained with a multimaterial decomposition algorithm: diagnostic value for renal mass and urinary stone evaluation[J]. Radiology, 2021, 298(3):611-619. DOI:10.1148/radiol.2021192448.
- [13] Kaza RK, Raff EA, Davenport MS, et al. Variability of CT attenuation measurements in virtual unenhanced images generated using multimaterial decomposition from fast kilovoltage-switching dual-energy CT[J]. Acad Radiol, 2017, 24(3):365-372. DOI:10.1016/j.acra.2016.09.002.
- [14] Borhani AA, Kulzer M, Iranpour N, et al. Comparison of true unenhanced and virtual unenhanced (VUE) attenuation values in abdominopelvic single-source rapid kilovoltage-switching spectral CT[J]. Abdom Radiol (NY), 2017, 42(3):710-717. DOI:10.1007/s00261-016-0991-5.
- [15] Çamlıdag İ. Compatibility of true and virtual unenhanced attenuation in rapid kV-switching dual energy CT[J]. Diagn Interv Radiol, 2020, 26(2):95-100. DOI:10.5152/dir.2019.19345.
- [16] Cao JJ, Lennartz S, Pisuchpen N, et al. Renal lesion characterization by dual-layer dual-energy CT: comparison of virtual and true unenhanced images[J]. AJR Am J Roentgenol, 2022, 219(4):614-623. DOI:10.2214/AJR.21.27272.
- [17] Laukamp KR, Kessner R, Halliburton S, et al. Virtual noncontrast images from portal venous phase spectral-detector CT acquisitions for adrenal lesion characterization[J]. J Comput Assist Tomogr, 2021, 45(1):24-28. DOI:10.1097/RCT.0000000000000982.
- [18] 杨琰昭,严福华,韩群,等. 双层光谱探测器 CT 腹部虚拟平扫代替常规平扫的可行性研究[J]. 中华放射学杂志, 2019, 53(1):33-39. DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2019.01.008. Yang YZ, Yan FH, Han Q, et al. Feasibility study on dual-layer spectral detector CT-derived virtual non-contrast images substitute for true non-contrast images[J]. Chin J Radiol, 2019, 53(1):33-39. DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2019.01.008.
- [19] Liang HW, Du SL, Yan GW, et al. Dual-energy CT of the pancreas: comparison between virtual non-contrast images and true non-contrast images in the detection of pancreatic lesion[J]. Abdom Radiol (NY), 2023, 48(8):2596-2603. DOI:10.1007/s00261-023-03914-0.
- [20] 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. DOI:10.1016/j.crad.2020.08.026.
- [21] Meyer M, Nelson RC, Vernuccio F, et al. Virtual unenhanced images at dual-energy CT: influence on renal lesion characterization[J]. Radiology, 2019, 291(2):381-390. DOI:10.1148/radiol.2019181100.

(收稿日期:2023-12-22)

本文引用格式:魏伟安,易婷,杨吉钱,等. 能谱 CT 多材料分离技术重建虚拟平扫对儿童肝肿瘤的诊断价值[J]. 临床小儿外科杂志, 2025, 24(1):58-64. DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202312053-011.

Citing this article as: Wei WA, Yi T, Yang JQ, et al. Application of virtual unenhanced images generated using multimaterial decomposition technology from dual-energy CT in pediatric CT with liver tumors[J]. J Clin Ped Sur, 2025, 24(1):58-64. DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202312053-011.