

论 著

化疗患者行个体化低流速腹部增强CT：双源CT低管电压高管电流的可行性分析*

刘 杰¹ 张怡存¹ 李林峰²
原 典¹ 齐 珂¹ 张梦圆¹
张炜斑¹ 魏楠楠¹ 高剑波¹
吕培杰^{1,*}

1.郑州大学第一附属医院放射科
(河南 郑州 450000)

2.上海西门子(上海 200000)

【摘要】目的 探讨在癌症患者中使用双源CT结合低流速和低管电压方案的可行性。**方法** 共纳入90名进行上腹部增强CT扫描的患者，并随机分为A组、B组和C组(每组30人)。在A组中，患者使用120kVp和448mgI/kg对比剂量进行扫描。B组患者以100kVp和336mgI/kg对比剂量进行扫描。C组患者以70kVp和224mgI/kg对比剂量进行扫描。对CT值、标准差、信噪比、对比噪声比、主观评分、对比剂剂量和流速进行测量。**结果** 在三组中，除了肾脏外，主观图像评分无统计学差异(均 $P>0.05$)。与其他组相比，C组在大多数感兴趣区域(ROIs)中显示出显著更高的CT值、更低的噪声水平以及更高的SNR和CNR值($P<0.05$)。与A组相比，C组所用对比剂剂量减少了47.3%(79.2 ± 13.7 vs. 41.7 ± 8.9 , $P<0.01$)，对比剂注射速率降低了19.2%(2.6 ± 0.5 vs. 2.1 ± 0.4 , $P<0.01$)。**结论** 在化疗后血管受损的患者中使用70kVp管电压结合高管电流的方法，在保证图像质量和诊断信心的同时降低流速是可行的。

【关键词】 低流速；低管电压；低对比剂剂量；高管电流；上腹部CT；

【中图分类号】 R445

【文献标识码】 A

【基金项目】 河南省卫生健康委员会科技攻关项目
(No.212102310142)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.03.037

Assessment of the Feasibility of Individualized Low Flow-rate Abdominal Enhanced CT in Chemotherapy Patients: A Study on Dual-source CT with Low Tube Voltage and High Tube Current*

LIU Jie¹, ZHANG Yi-cun¹, LI Lin-feng², YUAN Dian¹, Qi Ke¹, ZHANG Meng-yuan¹, ZHANG Wei-ting¹, WEI Nan-nan¹, Gao Jian-bo¹, LV Pei-jie^{1,*}.

1.Department of Radiology, The First Affiliated Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, Henan Province, China

2.CT collaboration, Siemens Healthineers Digital Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200000, China

ABSTRACT

Objective The primary aim of this investigation is to assess the viability of employing dual-source CT in conjunction with reduced tube current and diminished tube voltage for the post-chemotherapeutic evaluation of imaging in oncological patients. **Methods** A cohort of 90 individuals undergoing contrast-enhanced CT scans of the upper abdominal region was prospectively enrolled, with random allocation into three groups, denoted as A, B, and C, each comprising 30 subjects. Group A underwent scanning at 120 kVp with a contrast dosage of 448 mgI/kg, Group B at 100 kVp with 336 mgI/kg, and Group C at 70 kVp with 224 mgI/kg. Quantitative assessments encompassed CT attenuation values, standard deviations, signal-to-noise ratios (SNR), contrast-to-noise ratios (CNR), subjective ratings, contrast agent dosages, and flow velocities. **Results** Excepting renal regions, subjective image evaluations did not manifest statistically significant variances among the three groups (all $P>0.05$). Group C exhibited notably elevated CT attenuation values, decreased noise levels, and heightened SNR and CNR values across a majority of regions of interest (ROIs) relative to the comparator groups ($P<0.05$). In contrast to Group A, Group C demonstrated a substantial 47.3% reduction in contrast agent dosage (79.2 ± 13.7 vs. 41.7 ± 8.9 , $P<0.01$) and a 19.2% decrease in contrast injection rate (2.6 ± 0.5 vs. 2.1 ± 0.4 , $P<0.01$). **Conclusion** The application of a 70 kVp tube voltage combined with heightened tube current subsequent to chemotherapy-induced vascular impairment proves to be a feasible strategy. This approach concurrently achieves a reduction in flow velocity while upholding imaging quality and diagnostic confidence.

Keywords: Low Flow Rate; Low Tube Voltage; Low Contrast Agent; High Tube Current; Upper-abdomen Enhanced CT;

增强CT扫描目前已经广泛应用于上腹部病变的诊断及疗效评估，如胃癌、肝癌、肝脏囊肿、胰腺癌、胆囊息肉等疾病^[1-9]。然而，对比剂的使用会对患者产生各种影响，包括过敏反应、血管迷走神经反应等^[10-11]。尤其是对长期接受化疗的肿瘤患者而言，影响尤为明显。由于这些患者的血管也会暴露于药物中，对比剂外渗的可能性会升高^[10,12-13]。出现急性肾损伤(AKI)的风险也会升高^[14-15]。在这种情况下，增强腹部CT扫描的使用对患者的身体健康提出了更大的挑战^[16]。

化疗患者行增强CT时，减少对比剂用量和流速至关重要。目前，减少对比剂用量的技术包括使用不同浓度的对比剂和降低管电压等。值得注意的是，先前的研究表明^[17-18]，根据X射线物理学的基本原理，降低管电压可以在使用相同剂量对比剂的情况下大幅提高感兴趣区的CT值。

多项研究表明，降低管电压可在不影响图像对比度的情况下减少对比剂用量^[19-22]。然而，将低管电压(70kV)和高管电流技术结合用于腹部成像的研究探索还很有限。而在增强CT扫描过程中降低对比剂流速可能有助于减轻对比剂对患者血管的压力，从而降低外渗风险并将肾损伤降至最低。基于上述内容，本次研究旨在通过比较使用减少对比剂剂量、降低流速和降低管电压的低流速组与上腹部常规增强CT扫描的常规组获得的图像，评估低流速腹部CT增强方案的可行性。

1 资料与方法

1.1 研究对象 该研究共纳入了2022年11月1日至2023年3月30日期间在郑州大学第一附属医院放射科接受上腹部增强CT扫描的100例患者。其中，10例患者因对比剂渗出导致成像失败(A组6例、B组3例、C组1例)。排除标准为：年龄小于18岁或大于85岁；曾对碘或碘化造影剂过敏；BMI $>30\text{kg}/\text{m}^2$ ；肾功能受损(肾小球滤过率 $<30\text{mL}/\text{min}/1.73\text{m}^2$)；曾接受肝脏介入治疗而出现大量金属伪影的患者。表2显示了被纳入的90例患者中各种恶性肿瘤的分布情况。

1.2 CT检查和图像重建 采用双源CT对上腹部进行双期增强扫描。扫描范围从肝脏上缘至肾脏下缘。A组和B组采用120kVp和100kVp的常规管电压设置，而C组则尝试使用

【第一作者】刘 杰，男，副主任医师，主要研究方向：CT。E-mail: liujieict@163.com

【通讯作者】吕培杰，女，副主任医师，主要研究方向：CT。E-mail: lvpeijie2@163.com

70kVp的低电压设置，以进一步减少对对比剂用量。三组均使用固定的管电压进行图像采集，管电流调制为CARE Dose 4D，螺距0.5，球管旋转速度为1s/周。三组图像均以1.25mm和5mm的层厚和层间距进行重建，以进行主观评估。具体参数见表1。

使用对比剂(碘海醇，含碘350mgI/mL)经肘正中静脉注射，后跟注20mL生理盐水。从体模实验^[23]中我们可以得出，与120kVp下的扫描相比，在100kVp及70kVp设置下，碘的衰减分别增加了1.3及2.2倍，因此我们尝试在100kVp组中降低25%对比剂量，在70kVp组中降低50%对比剂量以达到足够的衰减。在A

组使用标准的对比剂量(448mgI/kg)^[24]。B组使用较低的对比剂量(336mgI/kg)，C组使用最低的对比剂用量(224mgI/kg)。分别于对比剂开始注射30s和60s后行动脉期和门静脉期扫描，注射速率根据对比剂总量设定，如公式所示：

对比剂流速_{A、B}=对比剂剂量÷30

对比剂流速_C=对比剂剂量÷20

即A、B组对比剂于30s内注射完毕；C组对比剂于20s内注射完毕。具体情况见表1。

表1 三组扫描参数及对比剂方案对比

	管电压(kVp)	管电流(mA)	球管旋转时间(s)	螺距	对比剂剂量计算(mL)	对比剂流速计算(mL/s)	对比剂剂量(mL)	对比剂流速(mL/s)
A组	120	CARE Dose 4D	0.5	1	体重*1.28mL/kg	对比剂量/30	79.2±13.7	2.6±0.5
B组	100	CARE Dose 4D	0.5	1	体重*0.96mL/kg	对比剂量/30	62.9±14.4	2.1±0.5
C组	70	CARE Dose 4D	0.5	1	体重*0.64mL/kg	对比剂量/20	41.7±8.8	2.1±0.4
F/χ ²							74.7	15.6
P值							<0.01	<0.01

1.3 图像评估

1.3.1 客观评分 记录腹主动脉、门静脉、肝脏、胰腺、肾脏和肌肉的CT值、标准偏差(SD)、信噪比(SNR)和对比噪声比(CNR)。图像噪声被定义为竖脊肌的CT值。每个血管的信噪比(SNR)和对比噪声比(CNR)按公式计算：SNR=CT值_{ROI}/噪声_{ROI}，CNR=(CT值_{ROI}-CT值_{竖脊肌})/噪声_{ROI}

1.3.2 主观评分 两名放射科医生在西门子的后处理工作站分别独立进行对已去除图像中患者信息图像的盲法定性分析。所有主观评分均以“五分法”进行评分，在主观噪声(5分，无明显噪声；4分，噪声较低；3分，噪声中等；2分，噪声较高；1分，噪声高)、伪影(5分，无明显伪影；4分，伪影较少；3分，有部分伪影但不影响图像诊断；2分，伪影较多，主干动脉显示尚可，但少数图像不能评价；1分，伪影明显，无法对图像进行诊断)、对比度(5分，对比度好，动脉血管结构显示清晰明了，侧支血管以及末梢血管显示清晰；4分，对比度较好，动脉显影清晰，侧支血管结构显示较清晰；3分对比度一般，动脉显影尚可，侧支血管结构及末梢血管显示尚可；2分，对比度较差，主干动脉显示尚可，局部侧支血管结构或末梢血管显示不清楚；1分，对比度差，动脉显影不良，图像极差导致解剖结构模糊不清)和整体图像质量(5分，优；4分，良；3分，中；2分，较差；1分，差)四个方面进行评价。

1.4 辐射剂量 记录了每位患者动脉阶段的CTDIvol(mGy)和剂量-长度乘积(DLP，mGy*cm)值。根据国际放射防护委员会(ICRP)的指导方针，将DLP乘以腹部检查换算系数0.015，就得到了估计的有效辐射剂量(mSv)。

1.5 统计分析 统计分析在统计软件Statistic Package for Science (SPSS) v.26.0 (Chicago, IL, USA) 中进行。单因素方差分析用于研究在三组 ROI 的 CT 值、SD值、SNR、CNR、CTDI

容积、DLP和有效辐射剂量方面的差异。Mann-Whitney U 检验用于分析主观评价等定性参数的差异。采用Kappa分析法，使用κ统计量评估定性参数的一致性。

2 结果

2.1 患者一般资料及对比剂流率 本研究共招募了 90 名受试者(37 名女性)，其中A组平均年龄为(58.8±11.5)岁，B组平均年龄为(61.2±11.7)岁，C组平均年龄为(59.7±11.7)，无统计学差异(P=0.74)。三种方案在体重指数(BMI)(P=0.74)也无明显统计学差异。

三组患者的造影剂剂量和注射率均存在显著差异，且这些差异具有统计学意义(所有P值均<0.05)。与A组相比，C组患者的造影剂剂量减少了47.3%，与B组相比减少了33.7%。此外，C组患者的造影剂流速比A组低19.2%，比B组低19.2%(表2)。

2.2 辐射剂量 三组CTDI vol(7.5±0.4 mGy vs 8.0±2.5 mGy vs 8.6±2.7 mGy，P=0.11)和 DLP(227.0±45.4mGy*cm vs 211.3±96.5 mGy*cm vs 213.5±89.1 mGy*cm，P=0.69)无明显差异。但值得注意的是，本研究中三种扫描方案的管电流存在显著差异(110.3±4.7mAs vs 198.9±62.7 mAs vs 718.2±210.8 mAs)。

2.3 图像质量 本次实验评分主要分为两部分，主观评分及客观评分。
2.3.1 客观评分 两组之间客观图像质量具体数据如表3所示。
2.3.2 主观评分 从A组、B组和C组动脉期图像的主观评估中可以看出，除动静脉期的肾脏(P_动=0.029，P_静=0.001)以外，其余图像之间的差异无统计学意义(P均>0.05)，详情见表4。这表明三组患者的扫描方案配置得当，图像质量符合诊断要求。如图1和图2所示，这两张图分别是三组常规病例和病变病例的图例对比。

表2 患者辐射剂量对比及患病情况

	管电流(mAs)	CTDIvol (mGy)	DLP(mGy*cm)	ED (msv)
A组	110.3±4.7	7.5±0.4	227.0±45.4	3.4±0.7
B组	198.9±62.7	8.0±2.5	211.5±96.5	3.2±1.2
C组	718.2±210.8	8.6±2.7	213.3±89.1	3.2±1.3
F/χ ²	210.03	2.32	0.37	0.37
P值	<0.01	0.11	0.69	0.69

续表2

	肺癌	肝癌	胃癌	乳腺癌	其他	化疗时间<1年	化疗时间≥1年	造影剂渗出
A组	4	4	3	1	7	5	5	6
B组	2	8	2	1	3	5	4	3
C组	1	13	1	1	4	6	3	1
F/χ ²								
P值								

表3 三组患者客观图像质量比较

组别		动脉期				静脉期			
		CT值	噪声值	SNR	CNR	CT值	噪声值	SNR	CNR
肝脏	A组	73.2±7.7	18.2±2.6	4.1±0.8	1.0±0.5	112.4±9.5	20.2±3.5	5.7±1.0	2.7±0.7
	B组	66.1±8.2	7.8±1.4	8.7±1.8	2.0±1.5	101.5±14.3	8.7±1.8	12.2±3.0	5.5±2.2
	C组	72.1±11.2	8.9±1.9	8.4±2.3	1.3±1.6	110.0±13.4	10.0±2.3	11.6±3.0	4.9±2.0
	F/ x ²	4.98	244.55	69.75	4.90	5.916	179.294	67.475	22.670
	P值	<0.05ac	<0.05ab	<0.05ab	0.009a	<0.05ac	<0.05ab	<0.05ab	<0.05ab
胰腺	A组	100.7±15.2	18.3±4.3	5.8±1.7	2.6±1.2	94.6±16.7	19.3±4.7	5.2±1.6	1.9±1.1
	B组	85.0±16.3	12.3±2.4	7.2±2.2	2.9±1.9	82.5±11.5	14.5±6.3	6.5±2.2	2.1±1.1
	C组	125.3±25.9	17.3±7.3	8.4±3.3	4.2±2.0	97.7±17.5	14.0±4.9	7.6±2.6	2.7±1.9
	F/ x ²	31.31	11.42	8.41	7.84	7.523	10.193	10.847	2.416
	P值	<0.05abc	<0.05ac	<0.05b	<0.05bc	<0.05ac	<0.05ab	<0.05b	0.095abc
肾脏	A组	57.1±9.2	15.3±5.6	4.5±2.6	0.0±1.2	140.0±38.6	20.5±6.6	7.5±2.9	4.2±2.1
	B组	100.5±18.7	33.6±10.9	3.3±1.4	1.6±0.8	129.3±19.1	26.1±9.3	5.6±2.3	3.2±1.4
	C组	173.4±49.1	48.1±19.1	4.7±4.1	3.1±3.1	165.8±35.4	25.9±11.7	8.0±4.6	4.9±3.2
	F/ x ²	117.62	51.94	1.86	19.33	4.834	3.692	3.952	4.020
	P值	<0.05abc	<0.05abc	0.161	<0.05abc	<0.05bc	0.029	0.023c	0.21c
腹主动脉/门静脉	A组	287.9±40.5	20.0±3.3	14.7±2.9	11.8±2.6	156.1±20.8	18.3±3.8	8.8±1.7	5.4±1.3
	B组	255.0±41.1	10.0±2.4	26.6±6.7	21.2±6.0	144.5±19.4	13.4±3.8	11.4±2.6	6.9±1.6
	C组	386.4±80.3	11.4±2.4	34.9±9.1	29.3±8.5	162.7±24.0	14.0±5.3	13.1±4.8	7.9±3.2
	F/ x ²	43.00	120.91	76.84	66.55	5.308	12.167	14.287	10.476
	P值	<0.05bc	<0.05ab	<0.05abc	<0.05abc	<0.05c	<0.05ab	<0.05ab	<0.05ab
肌肉	A组	56.2±7.7				59.0±5.5			
	B组	51.5±9.5				55.6±8.9			
	C组	61.6±9.9				63.8±8.9			
	F/ x ²	9.14				8.202			
	P值	<0.05c				<0.05bc			

注：a：AB之间有统计学差异；b：AC之间有统计学差异；c：BC之间有统计学差异。

表4 三组患者主观图像质量比较

		A组	B组	C组	F/ x ²	P值	Kappa值
动脉期	主观噪声	4.34±0.47	4.31±0.48	4.32±0.59	0.04	0.98	0.82
	伪影	4.09±0.72	3.94±0.77	4.08±0.60	0.71	0.701	0.85
	对比度	4.12±0.64	4.19±0.83	4.44±0.61	7.094	0.029	0.81
	总体图像质量	4.10±0.63	4.06±0.68	4.18±0.56	0.569	0.752	0.89
静脉期	主观噪声	4.31±0.49	4.13±0.62	4.38±0.53	2.377	0.305	0.76
	伪影	4.21±0.59	4.0±0.73	4.2±0.67	1.242	0.537	0.77
	对比度	4.00±0.62	4.20±0.75	4.44±0.58	13.301	0.001	0.83
	总体图像质量	4.10±0.52	4.18±0.655	4.32±0.59	4.511	0.105	0.79

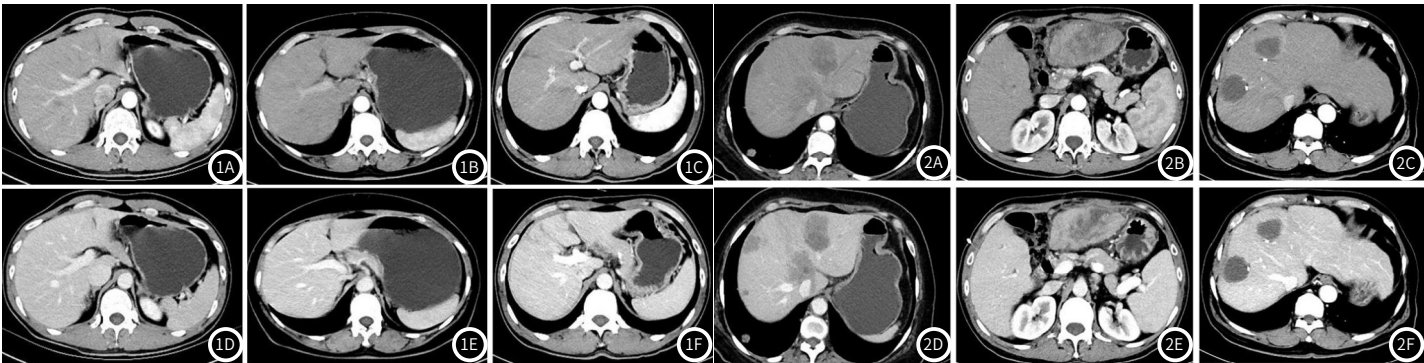


图1A-图1F 三组患者常规图像对比；图1A、1D展示了一位A组51岁的男性患者，使用120kV、105mAs进行扫描。身高1.8，体重66kg，对比剂量为84mL，对比剂流速为2.8mL/s。图1B、1E展示了一位B组57岁的女性，使用100kV、180mAs进行扫描，身高1.6m，体重60kg，对比剂量为58mL，对比剂流速为1.9mL/s。图1C、1F展示了一位C组54岁的男性，使用70kV、792mAs进行扫描，身高1.68，体重70kg，对比剂量为45mL，对比剂流速为2.3mL/s。
图2A-图2F 三组患者病变部位对比；图2A、2D展示了一位A组58岁的女性患者，使用120kV、110mAs进行扫描。身高1.65m，体重78kg，对比剂量为84mL，对比剂流速为2.8mL/s。图中显示肝左、右叶血管瘤，多发低密度灶。图2B、2E展示了一位B组53岁的男性，使用100kV、173mAs进行扫描，身高1.7m，体重60kg，对比剂量为58mL，对比剂流速为1.9mL/s。图中显示未肝左叶占位及肝周积液。图2C、2F展示了一位C组58岁的男性，使用70kV、1053mAs进行扫描，身高1.75m，体重82kg，对比剂量为57mL，对比剂流速为2.8mL/s。图片显示为肝硬化，肝癌术后改变。

3 讨 论

血管受损的化疗患者出现意外并发症的主要风险因素是使用高流速和较多的对比剂剂量。我们的研究尝试使用较低管电压和较高的管电流,使得腹部增强CT可减少47.3%的对比剂用量,同时将流速降低19.2%。

本次研究对比剂剂量及流速采取个体化方案,不同组别患者根据患者体重确定各组方案所对应的对比剂剂量及流速。有文献报道^[21-22,25],低电压下的x射线输出能量更接近33keV的碘k边缘,故管电压越低,相同的对比剂剂量在患者CT图像显示中CT值越高。基于这项原理,我们将70kVp组的对比剂剂量降为常规组的一半,即224mgI/kg。同时,我们将100kVp组的对比剂降为常规组的3/4,即336mgI/kg。

采用70kVp的管电压固然可以使得患者在较低对比剂剂量及对对比剂流速的情况下仍然保持足以满足诊断的CT值,但由于其管电压较低,相应的图像噪声值会显著增大,而图像噪声值过大会使得图像的细腻度严重下降,影响诊断医师对腹部疾病的诊断信心。为了降低图像噪声,提升图像质量,我们在本研究中将低管电压结合CARE Dose 4D技术,增大管电流,使得整体检查的辐射剂量基本保持不变的情况下增加图像的CT值的同时,图像噪声不至于过大。

针对动脉阶段肾脏区域噪声增大的问题,我们提出了以下解释。肾脏是血管高度扩张的器官,成人肾脏血流量平均为1200毫升/分钟,是体内血流灌注最多的器官之一^[26]。肾脏的自动调节机制可维持相对恒定的肾血流量。当我们按比例降低kV值和碘速率等参数时,CT值和噪声水平也会按比例增加。总体而言,肾动脉的图像质量保持一致。这一观察结果对因肾脏疾病需要进行腹部CTA的患者意义重大,为减少对比剂用量提供了机会。

本研究存在一些局限性。本研究做出的统计是针对肿瘤患者化疗术后血管情况较差的一般情况考虑,具体针对肿瘤患者化疗术后的个体差异性未能详细分析。其次,本研究是基于上腹部增强CT的扫描图像进行的统计分析,对于患者自身肿瘤情况在增强扫描后的图像未进行分组差异性分析,也未能对患者肿瘤部位的图像作出进一步的深入分析。

使用70kVp管电压结合高管电流能够有效地保持诊断所需的图像质量,同时减少了46%的对比剂用量,降低了22%的对比剂注射速率。这显著增加了化疗后肿瘤患者接受腹部CT增强扫描的可能性,从而降低了对比剂外渗的风险,同时也降低了对比剂对肾脏损伤的可能性,在临床工作具有较大的推广价值。

参考文献

- [1] Xu Y, Zhang B, Wang J. Gastrointestinal stromal tumour with liver metastasis presenting as gastric cancer[J]. *Diagnostics* (Basel), 2023, 13(3).
- [2] Yin S N, Shen G H, Liu L, et al. Triphasic dynamic enhanced computed tomography for differentiating cholesterol and adenomatous gallbladder polyps[J]. *Abdom Radiol* (NY), 2021, 46(10): 4701-4708.
- [3] 孙亚东, 祝丽敏. 磁共振成像联合增强CT确诊急性胰腺炎患者的病情发展研究分析[J]. *罕少疾病杂志*, 2022, 29(9): 49-50.
- [4] Park S, Cho E, Chueng S D, et al. Aptameric fluorescent biosensors for liver cancer diagnosis[J]. *Biosensors* (Basel), 2023, 13(6).
- [5] Khan A A, Narejo G B. Analysis of abdominal computed tomography images for automatic liver cancer diagnosis using image processing algorithm[J]. *Curr Med Imaging Rev*, 2019, 15(10): 972-982.
- [6] 吕丹丹. CT增强延迟扫描技术在鉴别肝脏肿瘤类型中与病理检查结果符合率分析[J]. *罕少疾病杂志*, 2022, 29(2): 52-53, 67.
- [7] Wang D C, Jang H J, Kim T K. Characterization of Indeterminate liver lesions on CT and MRI with contrast-enhanced ultrasound: what is the evidence[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2020, 214(6): 1295-1304.
- [8] Granata V, Grassi R, Fusco R, et al. Pancreatic cancer detection and characterization: state of the art and radiomics[J]. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*, 2021, 25(10): 3684-3699.

- [9] 李昱茜, 孟欣, 白炜, 等. 超声造影与增强MSCT对腹部占位性病灶诊断效能对比[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2022, 20(2): 146-148.
- [10] Ding S, Meystre N R, Campeanu C, et al. Contrast media extravasations in patients undergoing computerized tomography scanning: a systematic review and meta-analysis of risk factors and interventions[J]. *JBIR Database System Rev Implement Rep*, 2018, 16(1): 87-116.
- [11] Kanematsu M, Goshima S, Kawai N, et al. Low-Iodine-Load and Low-Tube-Voltage CT angiographic imaging of the kidney by using bolus tracking with saline flushing[J]. *Radiology*, 2015, 275(3): 832-840.
- [12] Roditi G, Khan N, van der Molen A J, et al. Intravenous contrast medium extravasation: systematic review and updated ESUR Contrast Media Safety Committee Guidelines[J]. *Eur Radiol*, 2022, 32(5): 3056-3066.
- [13] Wang C L, Asch D, Cavallo J, et al. Statement from the ACR Committee on Drugs and Contrast Media on the intravenous iodinated contrast media shortage[J]. *J Am Coll Radiol*, 2022, 19(7): 834-835.
- [14] Soo J Y, Jansen J, Masereeuw R, et al. Advances in predictive in vitro models of drug-induced nephrotoxicity[J]. *Nat Rev Nephrol*, 2018, 14(6): 378-393.
- [15] Weng Q, Sun H, Fang C, et al. Catalytic activity tunable ceria nanoparticles prevent chemotherapy-induced acute kidney injury without interference with chemotherapeutics[J]. *Nat Commun*, 2021, 12(1): 1436.
- [16] 王伟, 刘维军. 造影剂急性肾损伤最新检测手段及预防措施研究进展[J]. *中华老年心脑血管病杂志*, 2019, 21(01): 93-96.
- [17] Bae K T. Intravenous contrast medium administration and scan timing at CT: considerations and approaches[J]. *Radiology*, 2010, 256(1): 32-61.
- [18] 陆建红, 林大营, 周立新, 等. 256层螺旋CT双低剂量扫描用于冠脉支架内再狭窄评估中的图像质量、诊断价值和冠脉造影一致性分析[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2022, 20(04): 72-75.
- [19] Buls N, Van Gompel G, Van Cauteren T, et al. Contrast agent and radiation dose reduction in abdominal CT by a combination of low tube voltage and advanced image reconstruction algorithms[J]. *Eur Radiol*, 2015, 25(4): 1023-1031.
- [20] Iyer V R, Ehman E C, Khandelwal A, et al. Image quality in abdominal CT using an iodine contrast reduction algorithm employing patient size and weight and low kV CT technique[J]. *Acta Radiol*, 2020, 61(9): 1186-1195.
- [21] Yanaga Y, Awai K, Nakaura T, et al. Hepatocellular carcinoma in patients weighing 70 kg or less: initial trial of compact-bolus dynamic CT with low-dose contrast material at 80 kVp[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2011, 196(6): 1324-1331.
- [22] Nagayama Y, Tanoue S, Tsuji A, et al. Application of 80-kVp scan and raw data-based iterative reconstruction for reduced iodine load abdominal-pelvic CT in patients at risk of contrast-induced nephropathy referred for oncological assessment: effects on radiation dose, image quality and renal function[J]. *Br J Radiol*, 2018, 91(1085): 20170632.
- [23] Chen P A, Huang E P, Chen K T, et al. Comparison of four contrast medium delivery protocols in low-iodine and low-radiation dose CT angiography of the aorta[J]. *Clin Radiol*, 2020, 75(10): 797-799.
- [24] Lv P, Liu J, Chai Y, et al. Automatic spectral imaging protocol selection and iterative reconstruction in abdominal CT with reduced contrast agent dose: initial experience[J]. *Eur Radiol*, 2017, 27(1): 374-383.
- [25] Park M S, Ha H I, Ahn J H, et al. Reducing contrast-agent volume and radiation dose in CT with 90-kVp tube voltage, high tube current modulation, and advanced iteration algorithm[J]. *PLoS One*, 2023, 18(6): e287214.
- [26] Edwards A, Kurtcuoglu V. Renal blood flow and oxygenation[J]. *Pflugers Arch*, 2022, 474(8): 759-770.

(收稿日期: 2023-12-07)

(校对编辑: 姚丽娜)