

## 双能量CT的基本原理与研究进展

刘峰<sup>1</sup>, 朱月香<sup>2</sup>, 崔书君<sup>2</sup>, 杨飞<sup>2</sup>, 汤林梦<sup>1</sup>

1. 河北北方学院, 河北 张家口 075000; 2. 河北北方学院附属第一医院医学影像部, 河北 张家口 075000

**【摘要】**双能量CT(DECT)作为近几年影像学领域比较热门的一个研究方向,弥补了常规CT在疾病诊断中的部分不足,为疾病诊断、分期及治疗提供了更多影像学依据。本文概述DECT的基本原理、实现途径及近期研究进展,介绍DECT在临床应用中存在的不足,并展望其未来的发展方向。

**【关键词】**双能量CT;基本原理;后处理技术;临床应用;综述

**【中图分类号】**R318;R445.3

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2022)02-0198-05

### Basic principle of dual-energy CT and its research advance

LIU Feng<sup>1</sup>, ZHU Yuexiang<sup>2</sup>, CUI Shujun<sup>2</sup>, YANG Fei<sup>2</sup>, TANG Linmeng<sup>1</sup>

1. Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China; 2. Department of Medical Imaging, the First Affiliated Hospital of Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China

**Abstract:** Dual-energy CT (DECT), as a hot research direction in the field of imaging in recent years, makes up for some shortcomings of conventional CT in disease diagnosis, and provides more imaging bases for disease diagnosis, staging and treatment. Herein the basic principle, implementation approaches and recent research advance of DECT are summarized, and the shortcomings of DECT in clinical application are introduced briefly, and finally, the development direction of DECT in the future is discussed.

**Keywords:** dual-energy CT; basic principle; post-processing technique; clinical application; review

### 前言

自1972年首台CT机研发成功并应用于临床,CT便因其对解剖细节的显示而展现出广阔的发展前景,并迅速在临床工作中得以推广,但由于不同材料有时会表现出相同或近似的CT值(如含碘血液与钙化斑块),故难以实现物质区分是传统CT所存在的一个短板。1973年Godfrey Hounsfield的一段描述“两张图像采集自同一层面,一张采自100 kV条件下,一张采自140 kV条件下…。这样原子序数较高的区域就得以增强。目前的测试表明,碘( $Z=53$ )和钙( $Z=20$ )可以被区分开来”拉开了对双能量CT(DECT)研究的序幕<sup>[1]</sup>。但是早期的CT机扫描时间长,难以保障不同能级扫描层面的精确匹配,而且尚

不发达的计算机技术无法完成复杂的图像后处理工作。这使得DECT的应用仅仅局限于实验室水平而并未步入临床。直到2006年,西门子公司研发的双源CT问世后,这一情况才有所改善。

### 1 DECT的基本原理与实现途径

#### 1.1 基本原理

CT主要通过探测器接收透过人体的X线光子产生灰度不一的图像,X线衰减遵循Beer-Lambert定律,如一束强度为 $I_0$ 的X线穿过厚度为 $t$ 的均匀物体时,透射光子数可表示为 $I(E)=I_0(E)e^{-\mu(E)t}$ <sup>[2]</sup>,其中 $\mu(E)$ 为该光子束的线性衰减系数,受X线能量与被投照物体两个因素影响。在放射诊断所用的X射线能量范围内,X线与被投照物体的相互作用主要为光电效应和康普顿散射,已知光电效应与被投照物体的原子序数 $Z$ 和质量密度 $\rho$ 密切相关,主要在低能级X线下发挥作用,康普顿散射与电子密度 $\rho_e$ 密切相关,主要在高能级X线下发挥作用<sup>[3]</sup>。故 $\mu(E)$ 可以近似看作是光电效应所致的线性衰减系数 $\mu_p(E)$ 与康普顿效应所致的线性衰减系数 $\mu_c(E)$ 之和,即 $\mu(E)$ 可表示为: $\mu_p(E)=\rho_e C_p Z^{3.8} E^{-3.2}$ 与 $\mu_c(E)=\rho_e f_{KN}(E)$ 之和。当用两种能

**【收稿日期】**2021-10-23

**【基金项目】**河北省重点研发计划(21377769D)

**【作者简介】**刘峰,硕士,主要从事放射诊断等方面的研究,E-mail: 1049487693@qq.com

**【通信作者】**朱月香,主任医师、教授,硕士生导师,主要从事放射诊断等方面的研究,E-mail: hbzjkzyx@163.com

量扫描同一个物体时,就可以通过类似解方程的方式求得扫描对象的 $\rho_e$ 和 $Z$ ,进而确定被扫描物体的成分。同理,因为任何一种物质的衰减都可以视为 $\mu_p(E)$ 和 $\mu_c(E)$ 的组合,故某一特定物质在某能量级X线下的衰减系数可表示为在相同能量级下两种基物质(一般为钙和水)衰减系数的权重和,这样就可以实现物质分离的目的。

## 1.2 实现途径

目前,实现DECT的方法有双峰值管电压(kilovolts peak, kVp)法、单管双层探测器法及能量分辨光子计数探测器法,其中光子计数探测器法并未应用于临床实践,故本节着重介绍另两种方法。

**1.2.1 双kVp法** 双kVp法即用两种峰值管电压测量物体的方法。用能级不同且能谱重叠度小的X线扫描物体是DECT实现物质分离的基础,增大两次扫描中峰值管电压的差距是减少能谱重叠最有效的办法。目前存在单源与双源两种途径实现双kVp。单源顺序双扫描在两次扫描间隔切换管电压以实现双能数据集的获取。操作简单无需增加硬件设备,且可通过优化X射线谱增加有效能量差<sup>[4]</sup>,但扫描间隔长,易出现扫描层面不对位、错过增强采集时间等问题。故该方法仅适用于对静止、非增强器官的扫描,如骨密度测定、泌尿系统结石和痛风石成分分析等。在实际临床工作中,为了实现对运动或增强器官的扫描,还采用单源快速kVp切换的扫描方法,即在单次扫描过程中通过放射源在两种电压间的快速切换,完成患者信息的采集。此方法极大缩短了扫描时间,克服了单源顺序扫描存在的扫描层面不对位、错过增强采集时间等缺陷,但在CT机的设计上存在诸多技术难题,如双能光谱对比度有限、难以做到管电流与kVp同步切换以及无法实现用同步开关滤波器为每个频谱提供不同的滤波等。双源CT由几乎成正交分布的两组球管-探测器组成,一组在高能级X线下完成图像的扫描与采集,另一组在低能级X线下完成图像的扫描与采集。两组球管独立运行,管电压、管电流可根据实际情况调整,且方便添加滤光片以提高能谱对比度<sup>[5]</sup>。但额外增加的放射源缩小了高能线圈的测量范围,使得能量分辨数据只能在较小探测器的测量范围内获得,不利于肥胖患者外围的物质分解且正交分布的两组球管造成的交叉散射难以消除。

**1.2.2 单管双层探测器法** 单管双层探测器法由飞利浦公司引入临床,又名三明治探测器法。该探测器由上下两层闪烁体构成,上层闪烁体内含 $ZnSe$ 晶体,主要吸收低能光子,下层闪烁体由 $GdOS$ 物质构成,吸收透过的高能光子<sup>[6]</sup>。实际工作中为了增加两层

探测器所吸收光子的能谱差距,两层探测器间还设有一层吸收体。该CT机将能谱的分离工作放在了探测器层面完成,球管仅需发出不同能级X线即可。其优点是减少了扫描次数,可以获得完美的配准射线。这有效地避免了扫描层面不对位现象的发生,非常适合用于基于投影的材料分解<sup>[4]</sup>。但该方法对硬件要求高且可能出现各种问题,如低能图像与高能图像的噪声级别不同、闪烁体间重叠分布的灵敏度使能量分离效果下降等。故综合分析当下市场上常用的DECT系统以双源DECT的性能最好,快速kVp切换技术和三明治探测器法次之。

## 2 DECT的临床应用

DECT的临床应用大致可归纳为材料选择类应用与能量选择类应用两大类。临床常见的材料选择类应用包括虚拟平扫图(Virtual Non-Contrast Imaging, VNC)、碘图及材料区分技术;能量选择类应用包括虚拟单能成像(Virtual Monoenergetic Imaging, VMI)、有效原子序数图和有效电子密度图(Rho-Z maps)<sup>[7]</sup>。鉴于Rho-Z maps在临床应用中尚存在诸多限制,故本文着重介绍其他几类应用。

### 2.1 碘图与VNC

碘图与VNC均是依赖元素间能量衰减的差异所衍生出的临床应用,不同的是碘图是将体素中的碘量化生成的图,VNC则是将碘分离得到的图像<sup>[8]</sup>。目前关于VNC的临床价值尚存争议,部分研究发现VNC对高密度小病灶CT特征的描绘及肿块边缘CT值的评估与常规CT平扫存在一定差异<sup>[9-10]</sup>,但2018年的一项研究表明,相较常规CT平扫,VNC对水CT值的评估误差在5 HU以内。这一误差范围符合美国放射学会对CT质量控制的标准,不会对疾病的诊断产生较大影响<sup>[11]</sup>。这一发现也在多数临床试验中得到验证。Kahn等<sup>[12]</sup>研究表明VNC完全可以取代常规平扫,在急性胸腹部出血诊断中发挥作用,且较常规平扫图像,VNC可以获得更高的信噪比和更低的辐射剂量。泌尿系统中,Meyer等<sup>[13]</sup>研究表明VNC图像可以作为常规平扫图的替代品,描绘肾脏病变的影像特征。Ma等<sup>[14]</sup>对肾癌的研究亦证实了这一观点。消化系统中,VNC还可以用来去除肝脏中沉积的胺碘酮,这有助于真实反映胺碘酮服用者的肝脏平扫CT值<sup>[15]</sup>。此外,对于需要行多期增强扫描检查的患者,还可以通过免除多期扫描中的平扫期减少患者所受辐射剂量,这对需要长期复查的患者具有积极意义。

相较VNC而言,碘图的临床价值已得到普遍认可,其在临床工作中的应用也更为广泛。与传统增



强CT相比,碘图具有显示人体组织中碘分布、比较病变组织与周围组织的相对增强程度,并以增强百分比的形式量化表达等优势。基于以上特点,碘图在肺血流灌注相关性疾病的诊断方面取得了突破性进展。一项通过碘图评估COVID-19患者肺血流灌注的研究发现,血流灌注异常与实施有创机械通气的频率存在相关性<sup>[16]</sup>。在肺栓塞的诊断中,常规肺动脉CTA存在对微小栓子敏感度低、无法提供栓塞肺组织血流灌注信息的缺陷,多项研究表明借助肺灌注碘图能够极大程度地提高亚段及亚段以下栓子的检出率,这在一定程度上填补了常规肺动脉CTA对微小栓子诊断不足的缺陷,其提供的血流灌注信息还可作为肺灌注核素显象的替代检查在临床工作中发挥作用<sup>[17-21]</sup>。这对肺栓塞患者治疗方案的拟定及后期的随诊复查具有积极意义。Chae等<sup>[22-23]</sup>研究发现基于肺灌注碘图衍生出的肺灌注缺陷评分与左右心室直径比值具有较高的一致性,其灌注缺损程度对不良临床结局具有提示作用,可以用于评估肺栓塞的预后。此外,Ghandour等<sup>[24]</sup>研究表明碘图与VMI的最佳重建能量存在正相关,影像科医生可以选择图像质量最佳的VMI能级,提高肺栓塞的显示率。除外肺灌注相关性疾病,碘图在其他系统疾病的诊断中也取得了相应的进展。如在头颈部,碘图不仅有助于脑出血与造影剂外渗的鉴别,对活动性脑出血的预测也具有较高敏感度及准确性,这可能与DECT的彩色碘图有助于凸显活动性脑出血的斑点征等因素有关<sup>[25]</sup>。呼吸系统中,研究发现较传统增强CT而言,基于DECT衍生的碘浓度技术更适合鉴别不明来源的可疑肺转移瘤<sup>[26]</sup>。内分泌系统中,Zhou等<sup>[27]</sup>研究表明碘图与影像组学的结合可以很好地在术前预测甲状腺乳头状癌颈部淋巴结或中心淋巴结的转移状况。消化系统中,碘图较传统增强CT而言,对于射频消融术后残余肿瘤的检出、急性胃肠道隐匿性出血及胰腺病变的显示均表现出很高的准确性或敏感性<sup>[28-29]</sup>。对于肠道炎性病变克罗恩病,Dane等<sup>[30]</sup>研究表明碘图有助于其异质性及活动性的显示。此外,Stefania等<sup>[31]</sup>关于淋巴结的研究发现碘-水图和碘-脂图可以有效地从形态学水平鉴别、评估淋巴结转移状况,为疾病的早期治疗及确定治疗方案提供指导与影像学依据。

材料区分技术可以确切地计算出患者体内某一组织的物质构成并对其进行定量分析。目前该技术主要应用于泌尿系统、胆道系统结石及痛风石的定性诊断。国内外学者研究表明DECT能够准确地反映羟基磷灰石、草酸钙结石等的形态及化学组成<sup>[31-32]</sup>。一项基于Meta分析的研究表明,DECT对尿

酸结石诊断的敏感性、特异性和体外结石分析具有较高的一致性,可以作为体外结石分析的替代检查在临床工作中发挥作用<sup>[33]</sup>。由于尿酸结石可以采取碱化尿液、体外冲击波碎石等非手术方式进行治疗,故尽早明确结石成分对临床医生采取合理的治疗方案具有积极意义。DECT作为一项非侵入性检查,在分析结石成分的基础上还有助于腹部其他疾病的检出,在一定程度上减轻了患者痛苦、节省了检查费用。在胆道系统结石的诊断中,常规CT对低钙结石显示率低,故超声或内镜检查是目前确诊胆道结石常用的检查手段。最近一项研究表明,DECT能够显著地提高非钙化结石的显示率<sup>[34]</sup>。这一发现有望改进现有的检查流程,减少侵入性检查造成的胰腺炎、胆系感染等疾病的发生,且非钙化、低钙化胆固醇结石检出率的提高,可以为临床医师采取药物排石治疗提供更加详实的影像学证据。此外DECT在显示位置罕见或关节穿刺术阴性的痛风石或尿酸盐沉积中具有独特优势,是一种良好的替代滑膜液抽吸检测尿酸盐晶体的检查方式<sup>[35]</sup>。较常规CT而言,DECT与病理检查结果具有较高的一致性,能够较早发现尿酸盐结晶或痛风石,并通过后处理软件计算出其体积,这为临床确定及评估治疗方案提供直观的影像学依据<sup>[36-37]</sup>。Meta分析及相关研究表明在痛风及痛风性关节炎的诊断中,DECT的敏感性或特异性显著优于超声和MRI,且已被纳入2015年美国风湿病学会(ACR)和欧洲风湿病联盟(EULAR)分类标准<sup>[38-39]</sup>。

材料区分技术在临床工作中的另一应用便是双能去骨技术,与VNC和碘图类似,双能去骨技术也是基于材料分解算法生成的图像。在平扫CT中,有研究表明利用双能去骨技术有助于颅内小出血灶的显示<sup>[40]</sup>。这一发现对邻近骨骼微出血灶(如颅骨内板下出血、硬膜外血肿等)的检出具有重要意义。在CT血管成像方面,与单能量CT血管成像后处理技术相比,DECT自动去骨技术在骨的切除中更为精确,且相较减影CT而言,DECTA/CTV只进行了一次扫描,减少了辐射剂量、避免了两次扫描层面不对位情况的发生。但是相较DSA而言,DECT去骨技术存在高估钙化斑块段血管管腔狭窄程度的情况,这可能是部分容积效应及去骨不确切等因素造成的。国外学者Santis等<sup>[41]</sup>研究发现改良钙减影算法在对血管管腔狭窄程度的评估可以获得与DSA更为相近的结果,但这一算法是否可以与自动骨切除算法相整合,目前尚未有文献报道。虽然在评估血管狭窄程度方面,DECT尚不如DSA精准,但作为一项影像学检查,DECT却能够以一种无创而简洁的方式获得与DSA

具有高度一致性的结果。因此不得不承认,在临床工作中DECT的综合价值要优于DSA,且可以作为对有DSA禁忌证患者的一种替代检查而发挥作用。

## 2.2 VMI

与常规CT成像原理不同,VMI可以通过计算高低两能级X线扫描物体产生的数据集虚拟某单能级状态下该物体X线的衰减值而进行成像<sup>[42]</sup>。虚拟能级的选择可根据检查目的不同而进行调整。低能级VMI有助于提高碘的对比度噪声比(Contrast-to-Noise Ratio, CNR),利于出血、肿瘤性病变的显示。Sugrue等<sup>[43]</sup>关于胰腺损伤的研究发现,40 keV的VMI可以极大程度地提高图像的CNR,增加胰腺裂伤的检出率。高能级VMI有助于削弱金属植入物造成的射线硬化伪影<sup>[44]</sup>。Jin等<sup>[45]</sup>对桡骨远端金属植入物的研究发现120 keV的VMI图像伪影指数最低,130 keV的VMI图像质量最好。此外,刘彪等<sup>[46]</sup>关于VMI与金属伪影去除算法的差异性研究发现,VMI可以有效减少骨骼旁和金属植入物本身的伪影,利于对金属植入物本身状况的观测,金属伪影去除法则更倾向于减少周边软组织内的伪影,有助于周边软组织病变的检出。除外在减少金属伪影中发挥作为,VMI图像还可以用来补救因造影剂外渗或错过最佳采集时间造成的肺血管显影不佳的检查,这对减少患者辐射剂量及提高病变检出率具有积极意义<sup>[24]</sup>。

## 3 DECT的不足与发展趋势

自2006年进入临床至今,DECT已经取得了长足的发展与进步,其特殊的扫描模式为疾病的诊断提供了更多影像学依据,但DECT在实际临床应用中也存在些许问题。在能量分离方面,双源DECT存在的交叉散射问题,就目前技术水平而言还很难解决,单管双层探测器法虽然可以有效避免交叉散射现象的发生,但因为探测器材料的限制,其能量分离效果远不如双源DECT。此外,在图像的后处理工作中,重建图像的伪彩问题及去骨技术对骨和钙切分不确切的问题也尚未出现很好的解决方案。不过相信随着新兴材料的发展应用及计算机算法的优化,这些问题均会得到很好的解决。综合看来,DECT临床价值及发展潜力仍是巨大的。回顾CT的发展史不难发现,CT正在从最初的解剖成像逐步迈向功能成像,双能量扫描的实现无疑为这一步的迈出提供了一个重要的落脚点。当下DECT在功能成像领域的研究方向主要集中在与肺通气功能有关的疾病方面。Jeon等<sup>[47]</sup>对慢性阻塞性肺疾病(COPD)的研究发现,DECT可以显示哮喘-COPD重叠综合征患者与

COPD患者不同的肺通气生理改变。除了对肺通气功能的研究外,DECT功能成像在心肌血流灌注及甲状腺功能的研究方面也有所突破。Li等<sup>[48]</sup>通过DECT颈部扫描发现,DECT可通过对甲状腺含碘量的测量反映患者的甲状腺功能及碘营养水平。随着科研人员及临床工作者的不断努力,DECT在功能成像领域会取得更好的成绩。

## 【参考文献】

- [1] HOUNSFIELD G N. Computerized transverse axial scanning (tomography): part I. Description of system. 1973[J]. Br J Radiol, 1995, 68(815): H166-H172.
- [2] WANG A S, HSIEH S S, PELCA N J. 双能CT的基本原理、应用和未来展望(英文)[J]. CT理论与应用研究, 2012, 21(3): 367-386. WANG A S, HSIEH S S, PELCA N J. The basic principle, application and future prospect of dual-energy CT[J]. Research on the Theory and Application of CT, 2012, 21(3): 367-386.
- [3] GOO H W, GOO J M. Dual-energy CT: new horizon in medical imaging[J]. Korean J Radiol, 2017, 18(4): 555-569.
- [4] SO A, NICOLAOU S. Spectral computed tomography: fundamental principles and recent developments[J]. Korean J Radiol, 2021, 22(1): 86-96.
- [5] MILETO A, ANANTHAKRISHNAN L, MORGAN D E, et al. Clinical implementation of dual-energy CT for gastrointestinal imaging[J]. AJR Am J Roentgenol, 2021, 217(3): 651-663.
- [6] RASSOULI N, ETESAMI M, DHANANTWARI A, et al. Detector-based spectral CT with a novel dual-layer technology: principles and applications[J]. Insights Imaging, 2017, 8(6): 589-598.
- [7] AGOSTINI A, BORGHERESI A, MARI A, et al. Dual-energy CT: theoretical principles and clinical applications[J]. Radiol Med, 2019, 124(12): 1281-1295.
- [8] FORGHANI R, DE MAN B, GUPTA R. Dual-energy computed tomography: physical principles, approaches to scanning, usage, and implementation: part 2[J]. Neuroimaging Clin N Am, 2017, 27(3): 385-400.
- [9] OLIVIA POPNOE D, NG C S, ZHOU S, et al. Comparison of enhancement quantification from virtual unenhanced images to true unenhanced images in multiphase renal dual-energy computed tomography: a phantom study[J]. J Appl Clin Med Phys, 2019, 20(8): 171-179.
- [10] POPNOE D O, NG C S, ZHOU S, et al. Comparison of virtual to true unenhanced abdominal computed tomography images acquired using rapid kV-switching dual energy imaging[J]. PLoS One, 2020, 15(9): e0238582.
- [11] ANANTHAKRISHNAN L, DUAN X, RAJIAH P, et al. Phantom validation of spectral detector computed tomography-derived virtual monoenergetic, virtual noncontrast, and iodine quantification images[J]. J Comput Assist Tomogr, 2018, 42(6): 959-964.
- [12] KAHN J, FEHRENBACH U, BÖNING G, et al. Spectral CT in patients with acute thoracoabdominal bleeding-a safe technique to improve diagnostic confidence and reduce dose? [J]. Medicine (Baltimore), 2019, 98(25): e16101.
- [13] MEYER M, NELSON R C, VERNUCCIO F, et al. Virtual unenhanced images at dual-energy CT: influence on renal lesion characterization[J]. Radiology, 2019, 291(2): 381-390.
- [14] 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, 2020, 76(1): 81.e21-81.e27.
- [15] LAUKAMP K R, LENNARTZ S, HASHMI A, et al. Iodine accumulation of the liver in patients treated with amiodarone can be unmasked using material decomposition from multiphase spectral-detector CT[J]. Sci Rep, 2020, 10(1): 6994.
- [16] SANTAMARINA M G, RISCAL D B, BEDDINGS I, et al. COVID-19: What iodine maps from perfusion CT can reveal: a prospective Cohort study[J]. Crit Care, 2020, 24(1): 619.
- [17] WEIDMAN E K, PLODKOWSKI A J, HALPENNY D F, et al. Dual-



- energy CT angiography for detection of pulmonary emboli: incremental benefit of iodine maps[J]. *Radiology*, 2018, 289(2): 546-553.
- [18] KONG W F, WANG Y T, YIN L L, et al. Clinical risk stratification of acute pulmonary embolism: comparing the usefulness of CTA obstruction score and pulmonary perfusion defect score with dual-energy CT[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2017, 33(12): 2039-2047.
- [19] GROB D, SMIT E, PRINCE J, et al. Iodine maps from subtraction CT or dual-energy CT to detect pulmonary emboli with CT angiography: a multiple-observer study[J]. *Radiology*, 2019, 292(1): 197-205.
- [20] CELTIKCI P, HEKIMOGLU K, KAHARAMAN G, et al. Diagnostic impact of quantitative dual-energy computed tomography perfusion imaging for the assessment of subsegmental pulmonary embolism[J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2021, 45(1): 151-156.
- [21] 薛霖, 熊长明. 计算机断层摄影肺动脉造影与核素肺通气/灌注显像在肺血栓栓塞症诊断与随访中的价值研究进展[J]. *中国循环杂志*, 2019, 34(11): 1142-1144.
- XUE L, XIONG C M. Research progress on the value of computed tomography pulmonary artery angiography and radionuclide pulmonary ventilation/perfusion imaging in the diagnosis and follow-up of pulmonary thromboembolism [J]. *Chinese Journal of Circulation*, 2019, 34(11): 1142-1144.
- [22] CHAE E J, SEO J B, JANG Y M, et al. Dual-energy CT for assessment of the severity of acute pulmonary embolism: pulmonary perfusion defect score compared with CT angiographic obstruction score and right ventricular/left ventricular diameter ratio [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2010, 194(3): 604-610.
- [23] VAN DAM L F, KROFT L J M, HUISMAN M V, et al. Computed tomography pulmonary perfusion for prediction of short-term clinical outcome in acute pulmonary embolism[J]. *TH Open*, 2021, 5(1): e66-e72.
- [24] GHANDOUR A, SHER A, RASSOULI N, et al. Evaluation of virtual monoenergetic images on pulmonary vasculature using the dual-layer detector-based spectral computed tomography[J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2018, 42(6): 858-865.
- [25] 侯佳辰. 头颅双能量CTA成像在活动性脑出血诊治中的临床应用价值[J]. *影像研究与医学应用*, 2021, 5(3): 45-46.
- HOU J C. Clinical value of dual-energy CTA imaging in the diagnosis and treatment of active intracerebral hemorrhage [J]. *Imaging Research and Medical applications*, 2021, 5(3): 45-46.
- [26] DENIFFEL D, SAUTER A, DANGELMAIER J, et al. Differentiating intrapulmonary metastases from different primary tumors via quantitative dual-energy CT based iodine concentration and conventional CT attenuation[J]. *Eur J Radiol*, 2019, 111: 6-13.
- [27] ZHOU Y, SU G Y, HU H, et al. Radiomics from primary tumor on dual-energy CT derived iodine maps can predict cervical lymph node metastasis in papillary thyroid cancer[J]. *Acad Radiol*, 2021. DOI: 10.1016/j.acra.2021.06.014.
- [28] SANGHAVI P S, JANKHARIA B G. Applications of dual energy CT in clinical practice: a pictorial essay[J]. *Indian J Radiol Imaging*, 2019, 29(3): 289-298.
- [29] EL KAYAL N, LENNARTZ S, EKDAWI S, et al. Value of spectral detector computed tomography for assessment of pancreatic lesions [J]. *Eur J Radiol*, 2019, 118: 215-222.
- [30] DANE B, O'DONNELL T, REAM J, et al. Novel dual-energy computed tomography enterography iodine density maps provide unique depiction of Crohn disease activity [J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2020, 44(5): 772-779.
- [31] STEFANIA R, DAVIDE R, MARCO F, 等. 双能CT评估转移性淋巴结和非转移性淋巴结碘摄取量和分布的差异[J]. *国际医学放射学杂志*, 2018, 41(2): 247.
- STEFANIA R, DAVIDE R, MARCO F, et al. Difference of iodine uptake and distribution between metastatic and non-metastatic lymph nodes evaluated by dual energy CT [J]. *International Journal of Medical Radiology*, 2018, 41(2): 247.
- [32] SINGH A, KHANDURI S, KHAN N, et al. Role of dual-energy computed tomography in characterization of ureteric calculi and urinary obstruction[J]. *Cureus*, 2020, 12(5): e8002.
- [33] MCGRATH T A, FRANK R A, SCHIEDA N, et al. Diagnostic accuracy of dual-energy computed tomography (DECT) to differentiate uric acid from non-uric acid calculi: systematic review and meta-analysis[J]. *Eur Radiol*, 2020, 30(5): 2791-2801.
- [34] UYEDA J W, RICHARDSON I J, SODICKSON A D. Making the invisible visible: improving conspicuity of noncalcified gallstones using dual-energy CT[J]. *Abdom Radiol*, 2017, 42(12): 2933-2939.
- [35] CAROTTI M, SALAFFI F, FILIPPUCCHI E, et al. Clinical utility of dual energy computed tomography in gout: current concepts and applications[J]. *Acta Biomed*, 2020, 91(8-s): 116-124.
- [36] SINGH J A, BUDZIK J F, BECCE F, et al. Dual-energy computed tomography versus ultrasound, alone or combined, for the diagnosis of gout: a prospective study of accuracy[J]. *Rheumatology (Oxford)*, 2021, 60(10): e372-e374.
- [37] JAYAKUMAR D, SEHRA S T, ANAND S, et al. Role of dual energy computed tomography imaging in the diagnosis of gout[J]. *Cureus*, 2017, 9(1): e985.
- [38] SHANG J, ZHOU L P, WANG H, et al. Diagnostic performance of dual-energy CT versus ultrasonography in gout: a meta-analysis[J]. *Acad Radiol*, 2022, 29(1): 56-68.
- [39] ZOU Z, YANG M, WANG Y, et al. Gout of ankle and foot: DECT versus US for crystal detection[J]. *Clin Rheumatol*, 2021, 40(4): 1533-1537.
- [40] NORIHITO N, HIDENORI T, KAZUMA N, et al. Dual-energy bone removal computed tomography (BRCT): preliminary report of efficacy of acute intracranial hemorrhage detection[J]. *Emerg Radiol*, 2018, 25(1): 29-33.
- [41] SANTIS D D, CECCO C N D, SCHOEPP U J, et al. Modified calcium subtraction in dual-energy CT angiography of the lower extremity runoff: impact on diagnostic accuracy for stenosis detection[J]. *Eur Radiol*, 2019, 29(9): 4783-4793.
- [42] GIBNEY B, REDMOND C E, BYRNE D, et al. A review of the applications of dual-energy CT in acute neuroimaging[J]. *Can Assoc Radiol J*, 2020, 71(3): 253-265.
- [43] SUGRUE G, WALSH J P, ZHANG Y, et al. Virtual monochromatic reconstructions of dual energy CT in abdominal trauma: optimization of energy level improves pancreas laceration conspicuity and diagnostic confidence[J]. *Emerg Radiol*, 2021, 28(1): 1-7.
- [44] 杜斌, 李霞, 刘登洪, 等. 虚拟单色CT图像应用于放射治疗计划过程的初步评估[J]. *中国医学物理学杂志*, 2021, 38(8): 966-970.
- DU B, LI X, LIU D H, et al. Preliminary evaluation of the application of virtual monochrome CT images to the radiotherapy planning process [J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2021, 38(8): 966-970.
- [45] JIN Y H, HWAN H S, MI C B, et al. Metal artifact reduction in virtual monoenergetic spectral dual-energy CT of patients with metallic orthopedic implants in the distal radius[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2018, 211(5): 1083-1091.
- [46] 刘彪, 陈小玫, 郑进天, 等. 能谱CT虚拟单能图像重建和金属伪影去除算法在减少脊柱金属植入物伪影中的应用[J]. *医学影像学杂志*, 2019, 29(8): 1394-1398.
- LIU B, CHEN X M, ZHENG J T, et al. Application of energy spectrum CT virtual mono-energy image reconstruction and metal artifact removal algorithm in reducing spinal metal implant artifacts [J]. *Journal of Medical Imaging*, 2019, 29(8): 1394-1398.
- [47] JEON H H, MIN L S, BEOM S J, et al. Visual and quantitative assessments of regional xenon-ventilation using dual-energy CT in asthma-chronic obstructive pulmonary disease overlap syndrome: a comparison with chronic obstructive pulmonary disease[J]. *Korean J Radiol*, 2020, 21(9): 1104-1113.
- [48] LI Z T, ZHAI R, LIU H M, et al. Iodine concentration and content measured by dual-source computed tomography are correlated to thyroid hormone levels in euthyroid patients: a cross-sectional study in China[J]. *BMC Med Imaging*, 2020, 20(1): 10.

(编辑:黄开颜)