



## 双能CT在前列腺病变中的研究和应用进展

李宜泽, 陈子琦, 张璐瑶, 陈英敏

### Research and Application Progress of Dual-energy CT in Prostate Lesions

LI Yize, CHEN Ziqi, ZHANG Luyao, and CHEN Yingmin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2024.114>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 能谱CT在肝脏富血供病变中的应用和研究进展

Application and Research Progress of Spectral CT in Hypervascular Hepatic Lesions

CT理论与应用研究. 2021, 30(2): 253-262

#### 双能量CT在孤立性肺结节诊断中的研究进展

Advances in Dual-energy CT for the Diagnosis of Solitary Pulmonary Nodules

CT理论与应用研究. 2024, 33(6): 733-739

#### 双能量CT在痛风诊断和评估中的研究进展

Dual-energy CT in Gout: Advances in Diagnosis and Assessment

CT理论与应用研究. 2019, 28(4): 513-518

#### 双能量CT虚拟单能量成像在鉴别脊柱急性慢性压缩骨折中的应用价值

The Application Value of Dual-Energy CT Virtual Monoenergetic Imaging in the Differential Diagnosis of acute and Chronic Spinal Compression Fractures

CT理论与应用研究. 2021, 30(2): 209-216

#### 结直肠癌能谱CT的研究进展

Research Progress of Energy Spectrum CT of Colorectal Cancer

CT理论与应用研究. 2020, 29(6): 751-758

#### PI-RADS v2.1联合PSA相关指标预测PSA灰区前列腺癌的价值研究

Study on the Value of Predicting Prostate Cancer in the Grey Zone of PSA by Use of PI-RADS v2.1 Combined with PSA-related Indicators

CT理论与应用研究. 2021, 30(5): 567-574



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李宜泽, 陈子琦, 张璐瑶, 等. 双能 CT 在前列腺病变中的研究和应用进展[J]. CT 理论与应用研究 (中英文), 2025, 34(1): 65-72. DOI:10.15953/j.ctta.2024.114.  
LI Y Z, CHEN Z Q, ZHANG L Y, et al. Research and Application Progress of Dual-energy CT in Prostate Lesions[J]. CT Theory and Applications, 2025, 34(1): 65-72. DOI:10.15953/j.ctta.2024.114. (in Chinese).

## 双能 CT 在前列腺病变中的研究和应用进展

李宜泽<sup>a</sup>, 陈子琦<sup>b</sup>, 张璐瑶<sup>a</sup>, 陈英敏<sup>a✉</sup>

河北省人民医院 a) 医学影像科; b) 泌尿外科, 石家庄 050051

**摘要:** 前列腺病变是中老年男性常见的疾病之一。双能 CT (DECT) 通过一次扫描可获得高低两种不同 X 线能量的投影数据, 与传统 CT 相比, 对物质的分离及鉴别能力明显提高。DECT 不仅可提供病变与组织器官的常规解剖信息, 通过后处理还可获得虚拟单能谱影像、虚拟去钙影像、有效原子序数图、碘图、电子云密度图等能谱影像, 并衍生出碘浓度、标准化碘浓度、能谱衰减曲线斜率等相关定量参数, 进一步评估病变组织的功能变化, 有助于前列腺病变的早期发现、定性及定量评估。诸多研究证明, DECT 在前列腺病变的诊断及鉴别诊断、术前分期及质子治疗等方面已展现出较大的应用潜力。本文就 DECT 在前列腺病变的研究和应用进展进行介绍, 展望未来的研究方向。

**关键词:** 双能 CT; 前列腺病变; 鉴别诊断; 质子治疗

DOI:10.15953/j.ctta.2024.114 中图分类号: R 812; R 814 文献标识码: A

## Research and Application Progress of Dual-energy CT in Prostate Lesions

LI Yize<sup>a</sup>, CHEN Ziqi<sup>b</sup>, ZHANG Luyao<sup>a</sup>, CHEN Yingmin<sup>a✉</sup>

a).Department of Medical Imaging; b).Department of Urology,  
Hebei General Hospital, Shijiazhuang 050051, China

**Abstract:** Prostate lesions are common in middle-aged and elderly men. Dual-energy CT (DECT) can capture projection data at high and low X-ray energies in a single scan, significantly enhancing its ability to differentiate substances compared with traditional CT. DECT not only provides routine anatomical information of lesions, tissues, and organs, but also generates virtual single-energy spectral images, virtual decalcification images, effective atomic number diagrams, iodine maps, electron cloud density maps, and other energy spectral images through post-processing. Additionally, DECT derives relevant quantitative parameters such as iodine concentration, standardized iodine concentration, and slope of the energy spectrum decay curve, aiding in the functional evaluation of diseased tissues. This capability is crucial for the early detection and qualitative and quantitative evaluation of prostate lesions. Numerous studies have shown that DECT has great potential for the differential diagnosis of prostate lesions, preoperative staging, and proton therapy. This article reviews the research and application advancements of DECT in prostate lesions and explores future research directions.

**Keywords:** dual-energy CT; prostate lesions; differential diagnosis; proton therapy

前列腺病变的主要检查方法包括直肠指检、前列腺特异性抗原检测、经直肠彩色多普勒超声引导下穿刺活检等。超声穿刺为有创操作, 易受到邻近肠道气体的干扰, 术后部分患者可出现感染等并发症。

传统 CT 由于软组织分辨力相对较差, 其对前列腺病变的评价多局限于前列腺体积是否增大或钙化灶的存在与否, 对于腺体内的结节, 往往难以早期分辨, 尤其是密度差异不明显时, 因此, 其应用

收稿日期: 2024-06-25。

基金项目: 2020 年度河北省政府临床医学优秀人才培养项目 (冀卫办科教 [2021]1 号 2020-2023)。

第一作者: 李宜泽, 男, 放射影像学专业硕士研究生, 主要从事前列腺病变的相关研究, E-mail: 1195189835@qq.com。

通信作者: 陈英敏<sup>✉</sup>, 男, 主任医师、硕士研究生导师, 擅长双能量 CT 及磁共振新技术的研究应用, E-mail: hbghyngxiang@126.com。

受到一定限制。多参数 MRI 是评估前列腺疾病的重要影像学检查手段,但扫描时间较长、检查成本较高、对存在金属植入物的患者属于禁忌等。

DECT 作为一种非侵入性影像学检查方法,拥有多种能谱影像及定量参数,可对前列腺病变作出形态学及功能学评估,目前已在前列腺病变的诊断及鉴别诊断、术前分期及治疗中展现出了较大潜力。本文就 DECT 在前列腺病变的研究进展进行综述。

## 1 成像原理

DECT 的概念最初是在 1973 年提出的<sup>[1]</sup>,但直到 2006 年才首次在临床投入使用<sup>[2]</sup>,成像模式主要包括单源序列扫描双能量技术、单源双光束能量 CT、双源双能量 CT、单源瞬时管电压切换双能量 CT、双层探测器光谱 CT、光子计数 CT 等。这些成像技术的共同特点是在一次扫描结束后可获得高、低两种不同能量的 X 射线衰减信息,通过后处理技术可获得特有的能谱影像如虚拟单能谱影像(virtual monoenergetic images, VMI)、虚拟去钙(virtual non-calcium, VNCA)影像、碘图、有效原子序数图及电子云密度图等并能衍生出一系列定量参数如碘浓度(iodine concentration, IC)、标准化碘浓度(normalized iodine concentration, NIC)、有效原子序数(effective atomic number,  $Z_{\text{eff}}$ )及能谱衰减曲线斜率(spectral Hounsfield unit curve,  $\lambda_{\text{HU}}$ )等。

单源序列扫描双能量技术是在一次扫描过程中使用两种不同的管电压进行序贯扫描,从而得到两套独立的高低 X 线能量数据;单源双光束能量 CT 是在 X 射线球管的输出端放置一个金属过滤器,将 120kVp 的射线束分离为 68keV 和 86keV 的光子束,从而实现双能量成像;双源双能量 CT 是使用两套相互独立的 X 射线球管及对应的探测器,二者几乎垂直排列。在扫描过程中,一个球管使用低管电压、另一个使用高管电压,从而获得两种不同能量 X 线的衰减信息;单源瞬时管电压切换双能量 CT 是在机架旋转周期内对 X 射线球管的管电压进行瞬时切换(80kVp 和 140kVp),从而实现双能量采集;双层探测器光谱 CT 是将探测器分为上下两层,上层采用钆为基质的闪烁晶体,用来吸收 X 线束中的低能光子,下层则为硫氧化钷组成的稀土陶瓷探测器,用来吸收高能光子,从而获得双能量数据;光子计数 CT 是通过设定不同的能量阈值,采用特殊的光子计数探测器(碲化镉、碲化铋等)获得两种或多种不同能量的 X 线投影数据实现能量成像(spectral computed tomography:

fundamental principles and recent developments)<sup>[3]</sup>。

与常规 CT 相比,DECT 对物质的表征能力大大提高,可对前列腺病变进行更精准的定性及定量分析。

### 1.1 虚拟单能谱影像

传统 CT 为混合能量影像,病变与邻近组织的 CT 值有时比较相似,难以发现病灶并对其进行鉴别诊断。DECT 在扫描结束后通过重建可获得一系列不同单能量水平的 VMI,多项研究证明<sup>[4-6]</sup>,低能级 VMI 可提高病变和邻近组织之间的对比度,有助于小病灶的检出及病灶边界的识别;高能级 VMI 有助于减少线束硬化伪影与开花硬化伪影,金属伪影减少算法的使用则可在高能级 VMI 的基础上进一步降低伪影的影响。

能谱曲线反映了物质在不同 X 线能量水平下的衰减信息(CT 值),由于同一组织在不同能级 X 线下的衰减不同,不同组织在同一能级 X 线下的衰减也不同,因此,不同的组织具有不同的能谱曲线<sup>[7]</sup>。 $\lambda_{\text{HU}}$  反映了组织的平均衰减信息,通过比较两种组织的  $\lambda_{\text{HU}}$ ,可判断是否同源,为疾病的诊断提供丰富的定量信息。

### 1.2 物质分离成像

X 线与物质的相互作用主要是光电效应和康普顿效应,这两种效应共同决定了 X 线的衰减,不同的物质由于组织成分不同,因此,其 X 线衰减系数也不同。

任何组织的 X 线衰减系数都可由一个基物质对的 X 线衰减系数进行表征,从而可实现物质的成分分析及分离<sup>[8]</sup>。最常用的基物质对之一是碘和水,在 DECT 增强影像中,通过物质分离重建得到的碘图反映了对比剂在组织中的分布信息,通过选取感兴趣区可得到该区域的碘浓度,从而可在一定程度上反映组织的血供情况,而标准化碘浓度则是感兴趣区的碘浓度与同层面主动脉碘浓度的比值<sup>[9]</sup>,有助于排除个体血流量及血流速度的差异,更加客观地对组织的血流动力学情况进行评估。

此外,DECT 所特有的 VNCA 算法可利用三物质分解技术去除骨质中的钙,使骨髓的评估成为可能<sup>[10]</sup>。

### 1.3 有效原子序数

如果某化合物或混合物对 X 线的衰减系数和某元素的衰减系数相同,则该元素的原子序数即

为该化合物或混合物的有效原子序数；不同组织的有效原子序数具有一定的特异性，与 X 线的能量无关<sup>[1]</sup>。

生物标志物是指能客观测量和评价生理或病理过程，以及对治疗干预措施产生生物学效应的指标，包括活检组织或体液样本中检测到的生化指标、影像学检查发现的解剖、功能或分子指标等<sup>[2]</sup>。由于不同病灶或组织的有效原子序数不同，其有望成为一种影像生物标志物，为前列腺病变的诊断及鉴别诊断、术前分期等提供更客观的影像学依据。

## 2 应用

### 2.1 良恶性病变的鉴别

#### 2.1.1 良性前列腺增生与膀胱癌的鉴别

膀胱癌是中国男性泌尿生殖系统最常见的恶性肿瘤，好发于 50~70 岁，以后壁多见，其主要影像学表现为膀胱壁增厚并向腔内突出的不规则肿物。然而，在同样的年龄段，良性前列腺增生 (benign prostate hyperplasia, BPH) 是男性较易出现的良性病变，60 岁男性 BPH 的发病率在 50% 以上<sup>[3]</sup>。重度 BPH 可导致膀胱出口梗阻，出现与膀胱癌相似的症状。此外，BPH 还是膀胱癌发生的重要危险因素，二者经常同时存在<sup>[4]</sup>。

临床上，部分 BPH 呈结节或肿块样突向膀胱，此时传统 CT 难以与膀胱癌进行区分；由于膀胱镜检查为侵入性操作且无法观察周围结构浸润及淋巴结转移情况，部分患者对 MRI 的依从性差等原因，许多学者便尝试使用 DECT 对 BPH 和膀胱癌进行鉴别。

郝丽等<sup>[5]</sup>对 20 例膀胱后壁癌及 21 例前列腺增生突入膀胱内的患者行 DECT 平扫检查，发现 BPH 及膀胱癌在 40keV 单能量影像时的 CT 值差异最大，且膀胱癌的  $\lambda_{HU}$  明显大于 BPH (0.86 vs. 0.25)。Chen 等<sup>[6]</sup>进一步扩大样本量对 61 例膀胱癌及 57 例 BPH 行 DECT 扫描，得出了与郝丽等<sup>[5]</sup>类似的结果，他们还发现膀胱癌的  $Z_{eff}$  大于 BPH (7.99 vs. 7.80)；平扫 40keV 单能量影像的 CT 值对 BPH 的诊断效能最佳，当阈值 < 73.4HU 时，其 AUC、灵敏度及特异度分别为 0.817、77.0% 和 82.5%。上述研究表明  $\lambda_{HU}$  及  $Z_{eff}$  可提示病灶内的组织成分，有助于对膀胱癌及 BPH 的异质性进行定量分析；而低能级 VMI (尤其是 40keV) 则通过增加病灶与周围背景间的差异来提高对比度噪声比，进而提升了对膀胱癌及 BPH 的显示及鉴别能力，从而可在一定程度

上增加医师的诊断信心。

此外，蔡忠刚等<sup>[7]</sup>对 27 例膀胱癌及 22 例 BPH 患者行 DECT 增强扫描，对二者进行对比分析，结果发现膀胱癌在动脉期 40~60keV 单能量影像的 CT 值、NIC 及  $\lambda_{HU}$  均高于 BPH，但膀胱癌及 BPH 在静脉期 40~140keV 单能量影像 CT 值、NIC 及  $\lambda_{HU}$  均不存在统计学差异，提示增强扫描动脉期可能是区分二者的最佳诊断期相；而膀胱癌 NIC 高于 BPH，这可能是由于膀胱癌为恶性病变，其血管生成及细胞分裂增殖比较活跃，新生血管的基底膜尚不完整，造成增强扫描时碘对比剂聚集增多，表明碘基值可反映病灶的血供信息，作为影像生物标志物可在一定程度上提示医师的诊断可信度。

目前相关研究仍处于初步探索阶段，尚缺乏 BPH 与不同类型膀胱癌的鉴别诊断，有待进一步深入研究。

#### 2.1.2 良性前列腺增生与前列腺癌的鉴别

前列腺癌发病率在全球男性恶性肿瘤中居第 2 位，死亡率居第 5 位<sup>[8]</sup>。前列腺癌和 BPH 的症状较为相似，但治疗方法截然不同，对其进行准确的鉴别诊断至关重要。多参数 MRI 检查由于禁忌症较多、假阳性率较高等，部分患者往往无法获得较为精准的诊断；DECT 具有较多的衍生参数，可提供丰富的功能信息，有助于前列腺良恶性病变的定性及定量分析，提高对前列腺病变的检测敏感性和诊断准确性。

张晓斐等<sup>[9]</sup>对 38 个前列腺良恶性结节 (BPH 及前列腺癌，下同) 的 DECT 增强影像进行对比分析，发现前列腺癌动脉期、静脉期及实质期的 NIC 均高于 BPH，但两者在 75keV 单能量影像不同时相的 CT 值及 CT 值差均不存在统计学差异，这可能与较高光子能量水平下的对比度分辨率较差有关。Zhang 等<sup>[20]</sup>进一步对 52 个前列腺外周带良恶性结节的增强 DECT 研究指出，动脉期 NIC 拥有对前列腺癌最高的诊断效能，当阈值 > 1.24 时，其 AUC、灵敏度及特异度分别为 0.87、88% 及 71%，这可能是由于前列腺癌的新生血管较幼稚，基底膜尚不完整，增强扫描时，对比剂可早期渗入癌灶，表现为早期强化，而 BPH 虽血管密度较高，但多为成熟血管，基底膜比较完整，对比剂透过较慢，表现为晚期强化。邓明等<sup>[21]</sup>使用 DECT 对 84 个前列腺良恶性结节进行平扫分析，结果发现 BPH 在低能级 VMI 的 CT 值均高于前列腺癌，二者在高能级 VMI 的 CT 值则均不存在统计学差异，这可

能是由于高能级 X 线的穿透能力较强, BPH 及前列腺癌均无明显衰减, CT 值均较低; 此外, 他们还指出 BPH 的  $\lambda_{\text{HU}}$  及  $Z_{\text{eff}}$  均高于前列腺癌, 这可能是由于前列腺癌的组织成分比较单一, BPH 则含有较多增生活跃的腺体组织和上皮细胞, 导致 BPH 的组织密度较高、衰减较快。

鉴于较高的图像质量及鉴别诊断价值, 邓明等<sup>[21]</sup>推荐使用 60~70keV VMI 对前列腺良恶性病变进行观察及鉴别; 张晓斐等<sup>[22]</sup>则指出显示前列腺病灶的最佳单能量水平为 50keV, 该能级增强扫描不同期相的图像质量及对比度噪声比均高于传统混合能量图像; 刘雅楠等<sup>[23]</sup>则发现前列腺癌在静脉期 40keV 显示最佳。

综上, 目前显示前列腺病变的最佳单能量水平及最佳期相尚未达成共识, 这可能与扫描设备、技术和对比剂流速等存在差异有关, 未来有待进一步探索。

需要指出的是, 刘雅楠等<sup>[23]</sup>还发现 DECT 有助于区分临床有意义前列腺癌 (clinically significant prostate cancer, CsPCa) 及临床无意义前列腺癌 (clinically insignificant prostate cancer, CisPCa), CsPCa 的动脉期 IC、NIC、 $Z_{\text{eff}}$  及 40keV 的 CT 值均高于 CisPCa, 动脉期 IC 及动脉增强分数联合 PSA 水平对 CsPCa 的诊断效能最高, 其 AUC、灵敏度及特异度分别为 0.923、89.3% 和 100%; 但 CsPCa 及 CisPCa 的静脉期光谱参数则均不存在统计学差异, 考虑可能是部分 CsPCa 病灶生长较快导致血供相对不足出现坏死, 从而使所测参数的值较低所致。

前列腺 CT 灌注可反映不同病变组织的血供情况, 提供丰富的功能学信息, 有助于前列腺癌及 BPH 伴慢性炎症的鉴别<sup>[24]</sup>, 但由于其辐射剂量较高 (约  $(15 \pm 3.2) \text{mSv}$ )<sup>[25]</sup>, 临床上仍未广泛开展。双源双能量 CT 由于采用了新的迭代重建算法及自动管电压/管电流调制技术, 有助于降低患者的辐射暴露, 从而使前列腺 CT 灌注的临床应用成为可能。

张古沐阳等<sup>[26]</sup>使用第 3 代双源双能量 CT 对 6 例前列腺癌、3 例 BPH 伴慢性炎症患者行 CT 灌注扫描, 结果发现前列腺癌的灌注达峰时间明显低于 BPH 伴慢性炎症, 提示灌注达峰时间可能是鉴别二者的重要参数; 此外, 扫描过程中产生的辐射剂量与普通盆腔 CT 平扫相当 (平均有效剂量约为  $(3.5 \pm 0.3) \text{mSv}$ ), 提示双源双能量 CT 在推广前列腺 CT 灌注的临床应用方面具有重要潜能。但此研究样本量较小, 今后需纳入更多的病例行大样本

验证并进一步分析 CT 灌注对前列腺癌的诊断效能。

综上所述, DECT 能谱影像及系列定量参数对前列腺良恶性病变的相关鉴别具有重要参考价值, 有助于病变的无创诊断。不过目前尚缺乏 DECT 针对前列腺癌及膀胱癌两者鉴别诊断的研究, 未来可进一步探索。

## 2.2 前列腺癌转移性病变的检出及鉴别诊断

前列腺癌患者的分期对于选择合适的治疗策略以延长生存时间和提高生存质量至关重要。是否存在淋巴结或骨转移是分期的重要标准, 是决定预后最重要的因素之一。

形态学参数如大小、形状、边缘、囊变、坏死等征象依赖于医师的主观判断, 容易受到经验不足等因素的影响, 单纯使用这些征象来判断淋巴结转移具有一定的局限性。在临床工作中, 医师常常使用短径  $> 10 \text{mm}$  作为转移性淋巴结的诊断标准之一, 此时灵敏度/特异度为 12.8%/99.0%, 假阴性率较高<sup>[27]</sup>。

Lennartz 等<sup>[28]</sup>使用 DECT 静脉期 IC 对 34 例前列腺癌患者的良恶性淋巴结进行鉴别, 结果发现转移性淋巴结的 IC 高于非转移性淋巴结 ( $(1.9 \pm 0.6) \text{mg/mL}$  vs.  $(1.5 \pm 0.5) \text{mg/mL}$ ), 其诊断转移性淋巴结的 AUC、灵敏度及特异度分别为 0.72、81.3% 及 58.5%, 假阳性率较高, 这可能是由于研究对象中存在较高灌注的反应性或炎症性淋巴结, 进而导致定量碘图中的 IC 升高, 因此, 医师在评价淋巴结转移时应结合淋巴结的短径等形态学参数作出定性及定量联合评估才较为准确。

前列腺癌骨转移大部分表现为成骨细胞转移, 然而, 一些良性成骨细胞病变在传统 CT 上可与成骨细胞骨转移的表现相似, 不利于医师对前列腺癌硬化性骨转移的诊断。尽管骨扫描是评价是否存在骨转移的一线检测方法, 但其成本较高且存在较高的假阳性率, 因创伤或炎症也可表现为放射性核素的浓聚。

转移性肿瘤通常具有细胞密度升高及细胞核质比增加的特点, 这导致水分子在细胞外和细胞内的扩散受到限制, 从而使局部水密度发生变化, 这可能是 DWI 序列检测骨转移敏感度及特异度较高的原因<sup>[29]</sup>; 但 MRI 往往难以通过一次扫描便获得全身影像, 加之成像时间较长, 因此, 其应用受到了一定限制。DECT 通过一次扫描便可获取高、低两种不同 X 线能量的投影数据, 经后处理可得到有关骨内水密度信息的水-羟基磷灰石影像, 可有效

检测转移性骨病变<sup>[30]</sup>。

Ishiwata 等<sup>[31]</sup>对 31 例前列腺癌骨转移及 52 例无骨转移的前列腺癌患者行 DECT 平扫检查, 结果发现相比于仅使用常规 CT 影像, 联合常规 CT 及水-羟基磷灰石影像对前列腺癌骨转移的诊断效能出现了明显改善 (AUC 0.845 vs. 1.000, 灵敏度 71.0% vs. 100.0%, 特异度 98.1% vs. 100.0%), 但该研究为单中心回顾性研究, 且样本量较小, 结论难以推广, 未来需进行多中心、前瞻性、大样本分析。此外, 转移性骨肿瘤与非转移性骨病变的血供等特点往往不同, 在增强扫描时不同的期相常具有不同的增强效果, 因此, 我们可借助对比剂的流入或廓清情况对其加以鉴别。Liu 等<sup>[32]</sup>对 49 例前列腺癌骨转移和 57 例无骨转移的前列腺癌患者行 DECT 平扫及增强检查, 结果发现动脉期-平扫相关混合参数 (CT 值、 $\lambda_{HU}$  等) 对前列腺癌骨转移的诊断效能高于静脉期-平扫 (AUC 0.986 vs. 0.925, 灵敏度 94.0% vs. 88.1%, 特异度 96.7% vs. 88.0%), 提示动脉期可能更能反映前列腺癌硬化性骨转移的病变特点。今后可进一步扩大样本量前瞻性对比分析动脉期及静脉期的诊断效果, 以期减少扫描时间及辐射剂量。

骨髓转移是骨转移的初始阶段, 在常规 CT 影像中多表现为等密度或近似等密度病变, 诊断医师往往难以发现。DECT 的 VNCA 算法能够从松质骨中减去钙来显示骨髓, 有助于恶性肿瘤骨髓浸润的识别<sup>[33-34]</sup>, 可用于部分存在 MRI 禁忌证不能行 MRI 检查的患者的骨髓病变的评估。2018 年, Burke 等<sup>[35]</sup>利用 VNCA 技术准确识别出了前列腺癌等转移性骨病变, 并在 DECT 引导下成功进行了穿刺活检, 提示 DECT 及 VNCA 技术具有较高的临床应用潜能, 但样本量较小, 需扩大样本量进一步验证。

### 2.3 前列腺癌的质子治疗

前列腺癌的主要治疗方法包括手术治疗、化疗、放射治疗及内分泌治疗等。早期前列腺癌可通过放疗实现根治, 晚期前列腺癌的治疗以放疗为主, 即使出现远处转移, 放疗也有助于减轻患者症状、提高生活质量。放疗的一个重要原则是使肿瘤靶区得到均匀且充分的照射, 同时尽可能降低周围正常组织及危及器官的辐照受量, 从而降低副作用及二次癌变的风险。传统光子或电子放疗时, 肿瘤前方组织的辐照剂量高于靶区, 而肿瘤后方组织的辐射剂量仍较高, 这可能会导致许多并发症或后遗症, 从

而降低患者生存质量、增加其医疗负担。

质子治疗的发展近年来突飞猛进, 在放疗中的应用日渐广泛。理论上, 质子束在穿过介质时, 在一定深度会产生一个急剧上升的布拉格峰, 到达布拉格峰之前只会产生相对少量的辐射, 在到达布拉格峰之后辐射便会消失。通过用不同能量的质子束照射介质, 可以将一系列展开的布拉格峰定位在介质的预定深度。质子治疗利用剂量学特性可精确地覆盖肿瘤体积, 而不损害正常的周围组织, 可为前列腺癌患者提供恰当的治疗剂量<sup>[36]</sup>。

在日常的临床操作中, 放疗科医师需要在实施放疗前便计算好所需的质子治疗剂量, 这主要依赖于对患者体内质子射程的评估, 目前主要的方法是将常规 CT 扫描后得到的 CT 值在霍斯菲尔德查找表 (Hounsfield look-up table, HLUT) 中进行转换, 得到停止功率比 (stopping power ratio, SPR)。但是, 这些预估质子射程的任何不确定性都可能导致实际辐射剂量不能完全覆盖目标。

由于 CT 值及 SPR 由组织的电子云密度决定, 而 DECT 能够区分患者不同组织密度和化学成分的变化, 直接获得组织的电子云密度, 从而可改善 CT 值向 SPR 的转换, 其在质子治疗计划中的潜力已日渐显现<sup>[37-38]</sup>。

Zhu 等<sup>[39]</sup>的研究显示, 相较于常规 CT, DECT 对 SPR 的计算精度明显提高, 其最大误差分别为 12.8% 和 2.2%; 而在剂量计算中, DECT 的最大剂量计算误差仅为 1.4%, 常规 CT 则为 7.8%。Faller 等<sup>[40]</sup>发现, DECT 对 SPR 的预测误差及平均偏差也明显小于常规 CT (预测误差 0.5mm vs. 1.5mm, 平均偏差 0.6% vs. 1.5%), 与常规 CT 相比, 其将靶区的剂量预测精度提高了 12%~19%。Bär 等<sup>[41]</sup>指出, DECT 在质子束范围预测方面具有较大潜力, 与常规 CT 相比, 可将范围不确定性从 3.5% 降至 2%~2.5%。上述研究表明, DECT 有助于改善质子治疗计划中对 SPR 的预测, 降低质子束的范围不确定性, 从而有望缩小安全边界, 降低对周围组织的损伤; 但上述研究均是在模体中进行的, 无法完全模拟受检者的实际情况。2021 年, Berthold 等<sup>[42]</sup>使用传统 HLUT 查找表、DECT 优化后的 HLUT 查找表及 DECT 的 DirectSPR 算法对 5 例前列腺癌患者的 SPR 进行预测, 结果发现三者的平均预测精度分别为  $0.0\% \pm 0.5\%$ 、 $0.3\% \pm 0.4\%$  和  $1.8\% \pm 0.4\%$ , 提示 DECT 在前列腺癌质子治疗计划中可提升对 SPR 的预测精度, 具有一定的临床应用潜能。

此外,深度学习由于能高度自动化的学习和提取特征、在大规模数据处理及非线性关系建模方面拥有较强的能力,已越来越收到研究者的青睐。Lee 等<sup>[43]</sup>使用基于卷积神经网络的深度学习算法与 DECT 相结合用于预测前列腺癌患者 SPR 的范围不确定性,结果发现,与传统方法相比,其将不确定性从 1.10% 降低到 0.71%。但相关研究的样本量仍较小,今后需扩大样本量进一步深入研究。

### 3 小结与展望

DECT 所特有能谱图像及其衍生的多种定量参数在前列腺病变的诊疗方面发挥了重要的作用,具有广阔的应用前景。但目前的研究也存在着一些不足: ① 大多数研究为单中心、回顾性研究,且样本量较小,研究结论不易推广,未来需开展前瞻性、多中心、大样本研究,以期为临床提供更可靠的影像学依据; ② 多数研究的 ROI 为手动测量,可能存在观察者间的偏差,今后需开发半自动或自动的测量工具,实现精准测量、准确诊断; ③ 研究多局限在能谱参数在不同的病变或组织之间的差异中,缺乏与其它成像设备诊断准确性的比较; ④ 目前仍缺乏 DECT 对前列腺癌疗效评估、侵袭性预测的相关研究,未来需进一步探索。

### 参考文献

- [1] HOUNSFIELD G N. Computerized transverse axial scanning (tomography). 1. Description of system[J]. *The British Journal of Radiology*, 1973, 46(552): 1016-1022. DOI:10.1259/0007-1285-46-552-1016.
- [2] JOHNSON T R, KRAUSS B, SEDLMAIR M, et al. Material differentiation by dual energy CT: Initial experience[J]. *European Radiology*, 2007, 17(6): 1510-1517. DOI:10.1007/s00330-006-0517-6.
- [3] SO A, NICOLAOU S. Spectral computed tomography: Fundamental principles and recent developments[J]. *Korean Journal of Radiology*, 2021, 22(1): 86-96. DOI: 10.3348/kjr.2020.0144.
- [4] TAKUMI K, HAKAMADA H, NAGANO H, et al. Usefulness of dual-layer spectral CT in follow-up examinations: Diagnosing recurrent squamous cell carcinomas in the head and neck[J]. *Japanese Journal of Radiology*, 2021, 39(4): 324-332. DOI:10.1007/s11604-020-01071-8.
- [5] BABA A, KUROKAWA R, KUROKAWA M, et al. Dual-energy computed tomography for improved visualization of internal jugular chain neck lymph node metastasis and nodal necrosis in head and neck squamous cell carcinoma[J]. *Japanese Journal of Radiology*, 2023, 41(12): 1351-1358. DOI:10.1007/s11604-023-01460-9.
- [6] RAJIAH P S, KAMBADAKONE A, ANANTHAKRISHNAN L, et al. Vascular applications of dual-energy computed tomography[J]. *Radiologic Clinics of North America*, 2023, 61(6): 1011-1029. DOI:10.1016/j.rcl.2023.05.005.
- [7] LUO Y H, MEI X L, LIU Q R, et al. Diagnosing cervical lymph node metastasis in oral squamous cell carcinoma based on third-generation dual-source, dual-energy computed tomography[J]. *European Radiology*, 2023, 33(1): 162-171. DOI:10.1007/s00330-022-09033-6.
- [8] CHANG H Y, LIU C K, HUANG H M. Material decomposition using dual-energy CT with unsupervised learning[J]. *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, 2023, 46(4): 1607-1617. DOI:10.1007/s13246-023-01323-7.
- [9] LV P, LIN X Z, LI J, et al. Differentiation of small hepatic hemangioma from small hepatocellular carcinoma: Recently introduced spectral CT method[J]. *Radiology*, 2011, 259(3): 720-729. DOI:10.1148/radiol.11101425.
- [10] ZUO T, CHEN Y, ZHENG H, et al. Detection of bone marrow edema in osteonecrosis of the femoral head using virtual noncalcium dual-energy computed tomography[J]. *European Journal of Radiology*, 2021, 139: 109681. DOI:10.1016/j.ejrad.2021.109681.
- [11] KIM C, KIM W, PARK S J, et al. Application of dual-energy spectral computed tomography to thoracic oncology imaging[J]. *Korean Journal of Radiology*, 2020, 21(7): 838-850. DOI:10.3348/kjr.2019.0711.
- [12] Biomarkers Definitions Working Group. Biomarkers and surrogate endpoints: Preferred definitions and conceptual framework[J]. *Clinical Pharmacology and Therapeutics*, 2001, 69(3): 89-95. DOI:10.1067/mcp.2001.113989.
- [13] LERNER L B, MCVARY K T, BARRY M J, et al. Management of lower urinary tract symptoms attributed to benign prostatic hyperplasia: AUA guideline part I-initial work-up and medical management[J]. *The Journal of Urology*, 2021, 206(4): 806-817. DOI:10.1097/JU.0000000000002183.
- [14] LI S, ZENG X T, RUAN X L, et al. Simultaneous transurethral resection of bladder cancer and prostate may reduce recurrence rates: A systematic review and meta-analysis[J]. *Experimental and Therapeutic Medicine*, 2012, 4(4): 685-692. DOI:10.3892/etm.2012.660.
- [15] 郝丽, 刘爱连, 汪禾清, 等. CT 能谱成像鉴别膀胱后壁癌与前列腺增生突入膀胱[J]. *中国医学影像技术*, 2013, 29(2): 269-272. DOI:10.13929/j.1003-3289.2013.02.028.  
HAO L, LIU A L, WANG H Q, et al. Gemstone spectral imaging in differential diagnosis of posterior wall bladder cancer and prostate hyperplasia protruding into the bladder[J]. *Chinese Journal of Medical Imaging Technology*, 2013, 29(2): 269-272. DOI:10.13929/j.1003-3289.2013.02.028. (in Chinese).
- [16] CHEN A, LIU A, LIU J, et al. Application of dual-

- energy spectral CT imaging in differential diagnosis of bladder cancer and benign prostate hyperplasia[J]. *Medicine*, 2016, 95(52): e5705. DOI:10.1097/MD.0000000000005705.
- [17] 蔡忠刚, 杨爱萍. 能谱 CT 定量参数鉴别良性前列腺增生与膀胱癌[J]. *兰州大学学报(医学版)*, 2021, 47(3): 41-45. DOI:10.13885/j.issn.1000-2812.2021.03.009.
- CAI Z G, YANG A P. Identification of benign prostatic hyperplasia and bladder cancer based on spectral CT quantitative parameters[J]. *Journal of Lanzhou University (Medical Sciences)*, 2021, 47(3): 41-45. DOI:10.13885/j.issn.1000-2812.2021.03.009. (in Chinese).
- [18] SUNG H, FERLAY J, SIEGEL R L, et al. Global cancer statistics 2020: Globocan estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries[J]. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 2021, 71(3): 209-249. DOI:10.3322/caac.21660.
- [19] 张晓斐, 李剑颖, 邹爱华, 等. 宝石能谱 CT 碘含量测定对前列腺增生与前列腺癌的鉴别诊断价值[J]. *临床放射学杂志*, 2013, 32(6): 842-846. DOI:10.13437/j.cnki.jcr.2013.06.021.
- ZHANG X F, LI J Y, ZOU A H, et al. Dual energy spectral CT imaging in differentiation of prostatic carcinoma from benign prostatic hyperplasia[J]. *Journal of Clinical Radiology*, 2013, 32(6): 842-846. DOI:10.13437/j.cnki.jcr.2013.06.021. (in Chinese).
- [20] ZHANG X F, LU Q, WU L M, et al. Quantitative iodine-based material decomposition images with spectral CT imaging for differentiating prostatic carcinoma from benign prostatic hyperplasia[J]. *Academic Radiology*, 2013, 20(8): 947-956. DOI:10.1016/j.acra.2013.02.011.
- [21] 邓明, 王良, 张进华, 等. 宝石能谱 CT 多参数成像在鉴别前列腺癌与前列腺增生结节中的价值[J]. *临床放射学杂志*, 2016, 35(1): 118-122. DOI:10.13437/j.cnki.jcr.2016.01.033.
- DENG M, WANG L, ZHANG J H, et al. Gemstone spectral imaging with dual-energy CT for the differential diagnosis of prostate cancer and benign prostatic hyperplasia using[J]. *Journal of Clinical Radiology*, 2016, 35(1): 118-122. DOI:10.13437/j.cnki.jcr.2016.01.033. (in Chinese).
- [22] 张晓斐, 许建荣, 朱正飞, 等. 能谱 CT 显示前列腺病灶的最佳单能量研究[J]. *放射学实践*, 2016, 31(8): 747-751. DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2016.08.017.
- ZHANG X F, XU J R, ZHU Z F, et al. Study on optimal keV spectral CT monochromatic imaging for detection of peripheral prostatic lesions[J]. *Radiologic Practice*, 2016, 31(8): 747-751. DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2016.08.017. (in Chinese).
- [23] 刘雅楠, 王金凤, 乔英. 双层探测器光谱 CT 对前列腺癌的诊断价值[J]. *医疗卫生装备*, 2023, 44(5): 59-63. DOI:10.19745/j.1003-8868.2023095.
- LIU Y N, WANG J F, QIAO Y. Diagnostic value of dual-layer detector spectral CT for prostate cancer[J]. *Chinese Medical Equipment Journal*, 2023, 44(5): 59-63. DOI:10.19745/j.1003-8868.2023095. (in Chinese).
- [24] OSIMANI M, BELLINI D, DI CRISTOFANO C, et al. Perfusion MDCT of prostate cancer: Correlation of perfusion CT parameters and immunohistochemical markers of angiogenesis[J]. *American Journal of Roentgenology*, 2012, 199(5): 1042-1048. DOI:10.2214/AJR.11.8267.
- [25] CULLU N, KANTARCI M, OGUL H, et al. Feasibility study of CT perfusion imaging for prostate carcinoma[J]. *European Radiology*, 2014, 24(9): 2236-2244. DOI:10.1007/s00330-014-3212-z.
- [26] 张古沐阳, 孙昊, 薛华丹, 等. 第 3 代双源 CT 低剂量前列腺 CT 灌注的可行性[J]. *中国医学科学院学报*, 2017, 39(1): 101-106. DOI:10.3881/j.issn.1000-503X.2017.01.017.
- ZHANG G M Y, SUN H, XUE H D, et al. Feasibility study of low-dose prostate CT perfusion on third-generation dual-source CT[J]. *Acta Academiae Medicinae Sinicae*, 2017, 39(1): 101-106. DOI:10.3881/j.issn.1000-503X.2017.01.017. (in Chinese).
- [27] SAOKAR A, ISLAM T, JANTSCH M, et al. Detection of lymph nodes in pelvic malignancies with computed tomography and magnetic resonance imaging[J]. *Clinical Imaging*, 2010, 34(5): 361-366. DOI:10.1016/j.clinimag.2009.07.004.
- [28] LENNARTZ S, TÄGER P, ZOPFS D, et al. Lymph node assessment in prostate cancer: Evaluation of iodine quantification with spectral detector CT in correlation to PSMA PET/CT[J]. *Clinical Nuclear Medicine*, 2021, 46(4): 303-309. DOI:10.1097/RLU.0000000000003496.
- [29] GONG X Q, TAO Y Y, WANG R, et al. Application of diffusion weighted imaging in prostate cancer bone metastasis: Detection and therapy evaluation[J]. *Anti-cancer Agents in Medicinal Chemistry*, 2021, 21(15): 1950-1956. DOI:10.2174/1871520621666210118092641.
- [30] HUANG H C, SRINIVASAN R, SUN Y, et al. Detection of lumbar spine osseous metastases using dual-energy CT: Phantom results and preliminary clinical validation[J]. *American Journal of Roentgenology*, 2019, 212(2): 402-410. DOI:10.2214/AJR.18.19933.
- [31] ISHIWATA Y, HIEDA Y, KAKI S, et al. Improved diagnostic accuracy of bone metastasis detection by Water-HAP associated to non-contrast CT[J]. *Diagnostics (Basel, Switzerland)*, 2020, 10(10): 853. DOI:10.3390/diagnostics10100853.
- [32] LIU M C, HO C C, LIN Y T, et al. Opportunistic screening with multiphase contrast-enhanced dual-layer spectral CT for osteoblastic lesions in prostate cancer compared with bone scintigraphy[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 5310. DOI:10.1038/s41598-024-55427-5.
- [33] WERNER S, KRAUSS B, HORGER M. Dual-energy CT-based bone marrow imaging in multiple myeloma: Assessment of focal lesions in relation to disease status

- and MRI findings[J]. *Academic Radiology*, 2022, 29(2): 245-254. DOI:10.1016/j.acra.2021.01.029.
- [34] GONG H, BAFFOUR F I, GLAZEBROOK K N, et al. Deep learning-based virtual noncalcium imaging in multiple myeloma using dual-energy CT[J]. *Medical Physics*, 2022, 49(10): 6346-6358. DOI:10.1002/mp.15934.
- [35] BURKE M C, GARG A, YOUNGNER J M, et al. Initial experience with dual-energy computed tomography-guided bone biopsies of bone lesions that are occult on monoenergetic CT[J]. *Skeletal Radiology*, 2019, 48(4): 605-613. DOI:10.1007/s00256-018-3087-1.
- [36] WU Y Y, FAN K H. Proton therapy for prostate cancer: Current state and future perspectives[J]. *The British Journal of Radiology*, 2022, 95(1131): 20210670. DOI:10.1259/bjr.20210670.
- [37] WOHLFAHRT P, MÖHLER C, ENGHARDT W, et al. Refinement of the Hounsfield look-up table by retrospective application of patient-specific direct proton stopping-power prediction from dual-energy CT[J]. *Medical Physics*, 2020, 47(4): 1796-1806. DOI:10.1002/mp.14085.
- [38] PETERS N, WOHLFAHRT P, HOFMANN C, et al. Reduction of clinical safety margins in proton therapy enabled by the clinical implementation of dual-energy CT for direct stopping-power prediction[J]. *Radiotherapy and Oncology*, 2022, 166: 71-78. DOI:10.1016/j.radonc.2021.11.002.
- [39] ZHU J, PENFOLD S N. Dosimetric comparison of stopping power calibration with dual-energy CT and single-energy CT in proton therapy treatment planning[J]. *Medical Physics*, 2016, 43(6): 2845-2854. DOI:10.1118/1.4948683.
- [40] FALLER F K, MEIN S, ACKERMANN B, et al. Pre-clinical evaluation of dual-layer spectral computed tomography-based stopping power prediction for particle therapy planning at the Heidelberg Ion Beam Therapy Center[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2020, 65(9): 095007. DOI:10.1088/1361-6560/ab735e.
- [41] BÄR E, LALONDE A, ROYLE G, et al. The potential of dual-energy CT to reduce proton beam range uncertainties[J]. *Medical Physics*, 2017, 44(6): 2332-2344. DOI:10.1002/mp.12215.
- [42] BERTHOLD J, KHAMFONGKHRUEAC, PETZOLDT J, et al. First-in-human validation of CT-based proton range prediction using prompt gamma imaging in prostate cancer treatments[J]. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, 2021, 111(4): 1033-1043. DOI:10.1016/j.ijrobp.2021.06.036.
- [43] LEE H H, PARK Y K, DUAN X, et al. Convolutional neural network based proton stopping-power-ratio estimation with dual-energy CT: A feasibility study[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2020, 65(21): 215016. DOI:10.1088/1361-6560/abab57.