

宝石能谱CT在骨骼系统中的应用进展

解琪琪^{1,2}, 史卫东^{1,2}, 李文洲^{1,2}, 邓亚军^{1,2}, 任恩惠^{1,2}, 马靖琳², 谢建琴¹, 康学文¹, 汪静^{1,2}

1. 兰州大学第二医院骨科, 甘肃 兰州 730030; 2. 兰州大学甘肃省骨关节疾病研究重点实验室, 甘肃 兰州 730000

【摘要】宝石能谱CT是由传统CT转型而成的新型CT,球管可进行高、低能量X线瞬时切换,弥补了常规CT的缺点,有助于进一步区分不同组织成分。近年来能谱CT成像在骨质疏松程度的诊断,关节置换术后检查,痛风结石诊断与鉴别,骨髓瘤与骨转移瘤、骨岛的鉴别,骨损伤程度的诊断以及肌腱病变的诊断等方面的应用研究均取得了一定进展。虽然能谱CT成像对于骨密度的诊断尚无定论,有待进一步探究,但是从多方面综合评价,能谱CT成像对骨骼系统疾病的评估有巨大价值。本文将从以上几个方面对能谱CT在骨骼系统疾病中的应用进展进行综述。

【关键词】骨骼系统;能谱CT;骨密度;综述

【中图分类号】R816.8

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2019)10-1173-04

Progress on the application of gemstone spectral CT in skeletal system

XIE Qiqi^{1,2}, SHI Weidong^{1,2}, LI Wenzhou^{1,2}, DENG Yajun^{1,2}, REN Enhui^{1,2}, MA Jinglin², XIE Jianqin¹, KANG Xuwen¹, WANG Jing^{1,2}

1. Department of Orthopaedics, Lanzhou University Second Hospital, Lanzhou 730030, China; 2. Key Laboratory of Osteoarthritis of Gansu Province, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Gemstone spectral CT is a new type of CT transformed from traditional CT. The tube can take advantage of the high- and low-energy X-ray instantaneous switching, which not only makes up for the shortcomings of conventional CT, but also helps to further distinguish the components of different tissues. In recent years, energy spectrum CT has been used for the diagnosis of skeletal system lesions, such as diagnosis of osteoporosis, examination after arthroplasty, differential diagnosis of gout stone, differential diagnosis among myeloma, bone metastasis and bone island, diagnosis of bone injury, and diagnosis of tendon lesions. Some progresses have been made in the diagnosis of skeletal system lesions with energy spectrum CT, and the application of gemstone spectral CT in skeletal system is worthy to be further investigated. Although the diagnosis of bone mineral density with energy spectrum CT is still inconclusive, the comprehensive evaluation showed that energy spectrum CT has great values in the evaluation of skeletal system diseases. Herein the application of energy spectrum CT in skeletal diseases is reviewed from several aspects.

Keywords: skeletal system; energy spectrum CT; diagnosis; bone mineral density; review

前言

目前,常规CT是检出与诊断骨骼系统疾病必不可少的辅助工具,但存在不典型疾病检出容易出现漏诊或误诊的情况,随着临床需求的不断增加,开发简单、高精度的影像技术是当今临床亟待解决的问题。宝石

能谱CT技术作为近年来逐渐应用于临床的多参数及多种定量分析成像方法,其应用得到越来越多的关注,该技术完美结合了CT领域高清晰度与低剂量成像的优点,能够获得准确的单能量CT值、能谱曲线、有效原子序数和基物质浓度,较传统的CT在高空间分辨率、时间分辨率的基础上增加了能量分辨率及理化性质的分辨率,实现对组织微细结构和功能状态的量化检测,极大程度提高了诊断的准确性和安全性,近年来,在肿瘤诊断鉴别、血管病变评估、肺相关疾病的诊断都取得了极大的进展,同时为骨骼系统的病变,如骨质疏松程度的诊断、关节置换术后检查、痛风结石诊断与鉴别等提供了更直接、更有效的帮助,也为骨骼系统疾病的研究开辟了新的领域。

【收稿日期】2019-04-21

【基金项目】国家自然科学基金(81371230);兰州大学第二医院院内博士科研基金(ynbskyjj2015-1-01)

【作者简介】解琪琪,硕士研究生,研究方向:骨质疏松、骨生物力学, E-mail: 445629176@qq.com

【通信作者】汪静,博士,副主任医师,副教授,研究方向:骨质疏松、疼痛, E-mail: wang_jing@lzu.edu.cn

1 宝石能谱技术

能量CT在常规CT具备高空间分辨率和时间分辨率的基础上加入了能量分辨率,强大的后处理软件系统使其在临床应用中能达到与MRI相媲美甚至在某些方面优于MRI的程度。能谱CT利用瞬时切换的高、低(40~140 keV)两组能量数据进行投影数据空间重建多参数量化检测,实现CT成像的多参数模式(能谱曲线、基物质浓度、单能量图像及有效原子序数图像)。例如,能谱CT的物质分离图像使用基物质配对原理,利用两种配对基物质对X线的吸收衰减来实现,医学上最常用的是碘-水基物质,将基物质浓度作为指标,不仅能检测该组织的基物质含量,也能反映该组织的X线衰减检测组织内物质成分的种类及含量,常用于病灶鉴别诊断及病灶内成份的检测等,如骨质疏松的检测。单能量图像实现了测定物质在特定单能量下的CT值,其变化规律能反映组织在单能量下对X线衰减的差异,常用于病灶同源性的鉴别,如骨转移瘤的原发灶判定。有效原子序数图像实现组织内无机物成分的测定,痛风结石成分的检测。多数研究已经表明,能谱CT可以准确区分和量化混合物中的特定成分,反映组织损伤的血液供应^[1]。不同组织及结构的能谱曲线不同,因此该曲线可用于疾病的鉴别诊断、同源性分析等方面。在使用物质密度图像、单能量成像、能谱曲线和有效原子序数图进行能谱分析时,通常会使用最佳对比噪声比(CNR)、散点图及直方图3个分析工具^[2],为能谱CT多种参数和影像模式的应用和科研提供了便利而严谨的工具。

2 宝石能谱CT在骨骼系统疾病中的研究

能谱CT成像在保留常规CT功能的同时,可将混合能量成像转变为单能量成像,提供除传统成像外的能谱曲线、基物质图以及有效原子序数等多种成像信息。相比于常规CT扫描,能谱CT提高了软组织分辨率从而为骨骼系统疾病的诊断提供了新的方法。

2.1 骨密度(BMD)的测量

骨质疏松症是一种以系统骨量、骨强度及骨微结构损害为特征性疾病,常导致骨折风险增加^[3]。随着我国经济水平的不断快速发展,我国已经逐步进入老龄化社会,绝经后骨质疏松是引起老年妇女出现骨折的一种隐匿性疾病,患者出现骨痛、抽筋、抑郁等症状,常常会导致骨质疏松性骨折,对患者的生活质量造成严重影响^[4,5]。常规X线及CT检查依靠一些比较明显的征像,如骨小梁疏松、皮质变薄及骨质密度(CT值)改变,主观诊断性较强,对于影像表现不明显的骨质疏松患者则不能正常客观地反映BMD的变化。宝石能谱CT

以瞬时双电压(kVp)切换技术为核心,除了可以获得不同单能量(40~140 keV)图像外,还可以获得各种基物质密度图像,这些基物质图像可以应用于不同病灶成分物质的定量分析,因此能谱CT的基物质定量分析技术为BMD的准确测量提供了可能。陈清等^[6]通过对健康成年女性腰2(L₂)骨质钙含量的测定,来实现对BMD的精确测量,并与BMD测量的金指标DEXA进行对比,得出宝石能谱CT测量结果与DEXA测量结果一致,且均与年龄有关,表明该成像技术用于测量BMD是可行的。QCT是一种临床诊断骨质疏松症的重要检测技术,多项研究表明其对BMD测量的准确性高于DEXA^[7-9],但由于存在价格昂贵、操作繁琐、辐射剂量高等缺点,使其在临床上应用并不广泛。宋飞鹏^[10]对38节新鲜羊椎骨松质骨进行测量,并比较了QCT、能谱CT与煅烧灰重的相关性,得出两种技术都可用于BMD测量,且宝石能谱CT在使用钙-水基物质对时,测量BMD比QCT更为精确。以上研究均表明,宝石能谱CT可作为一种全新且精确度较高的BMD测量方法。此外,Wichmann等^[11]对40例患者160节腰椎进行能谱CT与DEXA的对比,结果同样表明能谱CT测量结果更为精确,在能谱CT所测得的参数基础上还三维重建了骨密度的分布,对于疾病的诊断更为直接,并且表明能谱CT能够有效避开一些骨皮质及骨质增生、硬化和破坏区域。韩合理等^[12]以DEXA作为金标准,参考WHO骨质疏松的诊断分组,对22例患者的L₁-L₄进行了宝石能谱CT分析,得出能谱CT选定HAP(脂)为诊断阈值时,灵敏度与特异度都很高,这也与之前的研究结果一致^[13-14],表明该成像技术能够很好地反映腰椎BMD的变化,对诊断骨质疏松具有较高价值,有望成为BMD测量的重要工具之一。

2.2 骨关节术后检查

对于许多骨科术后的病人,放置的金属植入物,如骨折髓内钉、外固定支架、钢板、螺钉及人工关节等,常规的CT或者MRI检查会产生放射状或星芒状伪影,严重影响图像质量从而影响术后固定、骨折愈合以及并发症的评估,宝石能谱CT可通过单能量成像和MARS技术去除伪影,从而提高骨科术后情况的评价。王山山等^[15]将含碘对比剂稀释成不同浓度置入硬塑料管体模中然后将其嵌入带有金属内固定的猪骨软组织中,分别用能谱CT及常规CT进行扫描,得出能谱CT能够显著减少金属植入物的伪影。霍爱华等对8例脊柱侧弯术后患者复查进行能谱CT不同参数的扫描,最终得出宝石能谱CT扫描联用MARs技术能够明显改善伪影,提高图像质量,这也与Lee等^[16]的研究结果一致。最近的研究也取得了相当大的进展,Große Hokamp等^[17]的研究确定了脊柱去除伪影的单能谱成像及MARs技术的最佳应用参数。以上结果均表明,宝石能谱CT有望

成为金属植入物患者术后复查的主要技术,但仍需要克服单能量成像的最佳参数没有统一标准等应用限制。

2.3 骨转移瘤的同源性分析、诊断及鉴别

骨转移瘤是指骨外恶性病变转移至骨而发病,以骨盆、脊柱、颅骨和肋骨等中轴骨最多见,主要临床表现为持续性疼痛,夜间加重,有时会出现肿块、病理性骨折和压迫症状,可引起融骨性破坏、骨质硬化或者两者并存的改变^[18-19]。能谱CT可将不同单能量成像绘制成能谱曲线,同一病变或者同源性病变的图像可重叠或者斜率是一致的,利用这种成像原理可以将同源性病变分辨出来,这样就可以找出骨转移瘤的原发灶,区分不同的骨转移瘤,为临床医生提供更多的资料信息。袁军辉^[20]对肺癌及乳腺癌合并脊柱成骨性转移瘤的患者进行能谱CT扫描,鉴别诊断了两种转移瘤,证实能谱CT可用于骨转移瘤的同源性分析。张进等^[21]通过应用能谱CT扫描技术,对病灶感兴趣区单能量成像所得参数进行比较得出脊柱肺癌转移瘤与骨髓瘤存在显著性差异,表明能谱CT对于骨转移瘤的诊断及鉴别有很大的参考意义;当成骨性骨转移瘤单发且缺乏其它特异性表现时,很难与骨岛进行鉴别。匡敏等^[22]比较了6例肺癌合并成骨性转移瘤36个病灶以及诊断为骨岛的21例病灶的能谱CT参数,证实了能谱CT可以用于肺癌骨转移瘤与骨岛的鉴别诊断,这也与Dong等^[23]的研究结果是相同的。以上结果均表明,能谱CT可以用于骨转移瘤的同源性分析,分析出其原发灶,同时也可以进行诊断及鉴别诊断,在骨肿瘤中的应用前景很好,值得进一步深入研究。

2.4 痛风结节的物质定性分析、诊断与鉴别

痛风性关节炎是由于尿酸盐沉积在关节囊、滑囊、软骨、骨质和其他组织中而引起的病损及炎症反应^[24-25],而痛风结节是引起骨质破坏发展的一个重要决定因素,完全确诊要由有创的病理检查完成,且临床上需要与假性痛风结石(焦磷酸钙双水化合物结晶)、羟磷灰石沉积症、类固醇结晶关节炎与骨关节旁增生钙化进行鉴别,而能谱CT可以对以上不同成分进行鉴别,同时为结石成分提供更多的信息。文献^[26]对确诊为痛风的19例患者进行外周关节能谱扫描,比较了痛风石与肌肉、皮质骨、松质骨所得参数的差异,得出能谱CT能进一步强化显示痛风石数量及更小的痛风石存在,可以清晰显示邻近关节骨质的侵蚀破坏情况。罗敏等^[27]对146例疑似痛风患者的疼痛部位行能谱CT与常规CT扫描,比较两者在鉴别骨关节旁增生钙化与痛风石的敏感度、特异性及准确性,最终得出能谱CT明显优于常规CT,且能够计算体内痛风石的数量及总体积,从而对患者体内痛风石的沉积情况进行评估,这与Shi等^[28]

的研究结果也是一致的。

2.5 肌腱病变及骨损伤

肌腱病变常用的诊断技术为MRI、超声、CT和X线^[29],超声主观性强,MRI存在成本高、禁忌证多等缺点,CT与X线漏诊率相对较高且成像质量尚需提高,能谱CT能够清晰显示肌腱及韧带结构,为临床提供更多的诊断信息。早在2011年,王君君等^[30]就确定了65 keV单能量是显示肌腱的最佳单能量,王刚等^[31]研究比较了能谱CT与MRI在手肌腱的影像学表现,发现能谱CT在显示骨骼、肌腱及手肌腱的三维关系方面具有明显优势,但显示腱鞘病方面表现却不如MRI。综合考虑成本、检出率等因素,能谱CT在肌腱疾病的诊断应用前景较好,是一种准确率较高的成像技术。近年来,有学者利用拉曼技术与能谱CT成像技术结合,从而达到高灵敏度活体内骨损伤的诊断,解决了传统的组织切片染色具有破坏性的缺点^[32],新发展起来的骨损伤三维成像技术存在灵敏度低、分辨率差等缺点,能谱CT成像实现了对骨损伤的高灵敏度检查。

3 结论

以上是能谱CT在骨骼系统疾病中研究较为成熟的几个方面,其多参数成像,不但有效降低患者的辐射剂量,提高影像空间分辨率,还将CT推入依靠功能学成像诊断疾病的领域,能够更准确地诊断骨质疏松,用于骨关节术后检查评估治疗效果,痛风结石性质的诊断及鉴别以及骨转移瘤的同源性分析、诊断和鉴别等,是一种高效、简单、无创的新型影像学检查方法,但是在很多方面如参数的统一仍旧需要深入的研究。

【参考文献】

- [1] ARNOLDI E, LEE Y S, RUZSICS B, et al. CT detection of myocardial blood volume deficits: dual-energy CT compared with single-energy CT spectra[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2011, 5(6): 421-429.
- [2] SARAPATA A, WILLER M, WALTER M, et al. Quantitative imaging using high-energy X-ray phase-contrast CT with a 70 kVp polychromatic X-ray spectrum[J]. Opt Express, 2015, 23(1): 523-535.
- [3] COSMAN F, CRITTENDEN D B, ADACHI J D, et al. Romosozumab treatment in postmenopausal women with osteoporosis[J]. N Engl J Med, 2016, 375(16): 1532-1543.
- [4] ADLER R A, EL-HAJJ FULEIHAN G, BAUER D C, et al. Managing osteoporosis in patients on long-term bisphosphonate treatment: report of a task force of the american society for bone and mineral research [J]. J Bone Miner Res, 2016, 31(1): 16-35.
- [5] BLACK D M, ROSEN C J. Postmenopausal osteoporosis[J]. N Engl J Med, 2016, 374(21): 2096-2097.
- [6] 陈靖,董越,葛莹,等. 探讨能谱CT宝石能谱成像技术用于骨密度测量的可行性[J]. 中国医学影像技术, 2013, 29(1): 133-137. CHEN J, DONG Y, GE Y, et al. Feasibility of bone density measurement based on CT gemstone spectral imaging[J]. Chinese

- Journal of Medical Imaging Technology, 2013, 29(1): 133-137.
- [7] YU E W, THOMAS B J, BROWN J K, et al. Simulated increases in body fat and errors in bone mineral density measurements by DXA and QCT[J]. J Bone Miner Res, 2012, 27(1): 119-124.
- [8] YU E W, BOUXSEIN M L, ROY A E, et al. Bone loss after bariatric surgery: discordant results between DXA and QCT bone density[J]. J Bone Miner Res, 2014, 29(3): 542-550.
- [9] MAO S S, LI D, SYED Y S, et al. Thoracic quantitative computed tomography (QCT) can sensitively monitor bone mineral metabolism: comparison of thoracic QCT vs lumbar QCT and dual-energy X-ray absorptiometry in detection of age-relative change in bone mineral density[J]. Acad Radiol, 2017, 24(12): 1582-1587.
- [10] 宋飞鹏. 能谱CT与QCT对骨密度测定的比较实验研究[D]. 太原: 山西医科大学, 2014.
- SONG F P. Comparative experimental study of bone density measurement with energy spectrum CT and QCT[D]. Taiyuan: Shanxi Medical University, 2014.
- [11] WICHMANN J L, BOOZ C, WESARG S, et al. Dual-energy CT-based phantomless *in vivo* three-dimensional bone mineral density assessment of the lumbar spine[J]. Radiology, 2014, 271(3): 778-784.
- [12] 韩合理, 郝万江, 马千里, 等. 宝石能谱CT(GSI)诊断骨质疏松的应用价值初探[J]. 医学影像学杂志, 2018, 28(2): 294-297.
- HAN H L, YU W J, MA Q L, et al. Preliminary studies of the value of gemstone spectral CT in lumbar osteoporosis[J]. Journal of Medical Imaging, 2018, 28(2): 294-297.
- [13] 张文娟, 张国晋, 王丹, 等. 基于能谱CT基物质成像技术的骨密度测量[J]. 中国医学影像学杂志, 2017, 25(2): 121-124.
- ZHANG W J, ZHANG G J, WANG D, et al. Bone mineral density measurement based on energy spectrum CT-based material imaging technique[J]. Chinese Journal of Medical Imaging, 2017, 25(2): 121-124.
- [14] WESARG S, KIRSCHNER M, BECKER M, et al. Dual-energy CT-based assessment of the trabecular bone in vertebrae[J]. Methods Inf Med, 2012, 51(5): 398-405.
- [15] 王山山, 冯卫华, 李晓飞, 等. 宝石能谱CT去除金属植入物伪影的实验研究[J]. 滨州医学院学报, 2011, 34(2): 130-132.
- WANG S S, FENG W H, LI X F, et al. Experimental study on the removal of metal implant artifacts by gemstone spectrum CT[J]. Journal of Binzhou Medical University, 2011, 34(2): 130-132.
- [16] LEE Y H, PARK K K, SONG H, et al. Metal artefact reduction in gemstone spectral imaging dual-energy CT with and without metal artefact reduction software[J]. Eur Radiol, 2012, 22(6): 1331-1340.
- [17] GROBE HOKAMP N, NEUHAUS V, ABDULLAYEV N, et al. Reduction of artifacts caused by orthopedic hardware in the spine in spectral detector CT examinations using virtual monoenergetic image reconstructions and metal-artifact-reduction algorithms[J]. Skeletal Radiol, 2018, 47(2): 195-201.
- [18] YIN J J, MOHAMMAD K S, KAKONEN S M, et al. A causal role for endothelin-1 in the pathogenesis of osteoblastic bone metastases[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2003, 100(19): 10954-10959.
- [19] LIN S, LEE Y, YU G, et al. Endothelial-to-osteoblast conversion generates osteoblastic metastasis of prostate cancer[J]. Dev Cell, 2017, 41(5): 467-480.
- [20] 袁军辉. 能谱CT成像对肺癌和乳腺癌脊柱成骨性转移瘤的鉴别诊断价值[D]. 大连: 大连医科大学, 2014.
- YUAN J H. The value of spectral CT imaging in the differential diagnosis of lung cancer and breast cancer osteogenesis metastasis[D]. Dalian: Dalian Medical University, 2014.
- [21] 张进, 王艺婷, 石瑞, 等. 能谱CT定量参数鉴别脊柱肺癌骨转移瘤及骨髓瘤的研究[J]. 中国现代医生, 2017, 55(32): 113-116.
- ZHANG J, WANG Y T, SHI R, et al. Application study of quantitative parameters of energy spectrum CT in the differentiation of multiple myeloma and bone metastases of spines[J]. China Modern Doctor, 2017, 55(32): 113-116.
- [22] 匡敏, 郭颖华, 胡小艳, 等. 能谱CT鉴别肺癌成骨性转移瘤与骨岛[J]. 现代生物医学进展, 2016, 16(23): 4487-4490.
- KUANG M, WU Y H, HU X Y, et al. Application of spectral CT imaging in differential diagnosis of osteoblastic metastases and bone islands[J]. Progress in Modern Biomedicine, 2016, 16(23): 4487-4490.
- [23] DONG Y, ZHENG S, MACHIDA H, et al. Differential diagnosis of osteoblastic metastases from bone islands in patients with lung cancer by single-source dual-energy CT: advantages of spectral CT imaging[J]. Eur J Radiol, 2015, 84(5): 901-907.
- [24] BECKER M A, SCHUMACHER H R, WORTMANN R L, et al. Febuxostat compared with allopurinol in patients with hyperuricemia and gout[J]. N Engl J Med, 2005, 353(23): 2450-2461.
- [25] QASEEM A, HARRIS R P, FORCIEA M A. Management of acute and recurrent gout: a clinical practice guideline from the american college of physicians[J]. Ann Intern Med, 2017, 166(1): 58.
- [26] 王旭, 李小虎, 刘斌, 等. 双能量能谱CT检测痛风石沉积的初步研究[J]. 安徽医科大学学报, 2013, 48(8): 973-975.
- WANG X, LI X H, LIU B, et al. Preliminary study of dual energy spectral CT for detection of tophi depositing[J]. Acta Universitatis Medicinalis Anhui, 2013, 48(8): 973-975.
- [27] 罗敏, 颜森森, 岑秀雅, 等. 单源能谱CT在鉴别骨关节旁增生钙化与痛风石中的价值[J]. 中国基层医药, 2016, 23(5): 679-682.
- LUO M, YAN S S, CEN X Y, et al. The value of single-source spectrum CT in differentiating of calcification and tophus[J]. Chinese Journal of Primary Medicine and Pharmacy, 2016, 23(5): 679-682.
- [28] SHI D, XU J X, WU H X, et al. Methods of assessment of tophus and bone erosions in gout using dual-energy CT: reproducibility analysis[J]. Clin Rheumatol, 2015, 34(4): 755-765.
- [29] SHARMA P, MAFFULLI N. Current concepts review tendon injury and tendinopathy: healing and repair[J]. J Bone Joint Surg Am, 2005, 87(1): 187-202.
- [30] 王君君, 张成琪, 邓凯. 宝石能谱CT显示肌腱的最佳单能量[J]. 医学影像学杂志, 2011, 21(8): 1252-1254.
- WANG J J, ZHANG C Q, DENG K. The best key in demonstrating tendons of gemstone spectral CT[J]. Journal of Medical Imaging, 2011, 21(8): 1252-1254.
- [31] 王刚, 王克列, 郝俊雄. MRI与能谱CT在诊断手肌腱病变中的临床应用价值[J]. 医学综述, 2013, 19(12): 2260-2261.
- WANG G, WANG K L, HAO J X. The clinical application value of magnetic resonance imaging and spectral computed tomography in hand tendon injury[J]. Medical Recapitulate, 2013, 19(12): 2260-2261.
- [32] 王颖. 基于表面增强拉曼技术以及宝石能谱CT成像技术的高灵敏度活体内骨损伤诊断[C]. 中国化学会第30届学术年会, 大连: 2016.
- WANG Y. High-sensitivity *in vivo* bone damage diagnosis based on surface-enhanced Raman technique and gem energy spectrum CT imaging technique[C]. The 30th Academic Annual Meeting of the Chinese Chemical Society, Dalian: 2016.

(编辑: 薛泽玲)