

中老年胸腰椎采用能谱 CT 物质分离技术对骨密度测量及骨质疏松情况

张 晶

太原钢铁(集团)有限公司总医院影像中心 山西 太原 030000

【摘 要】目的：探究能谱 CT 物质分离技术与中老年胸腰椎骨密度测量及骨质疏松情况的关系，评价不同骨状况下 HAP-水含量的差异，为骨质疏松的无创性影像筛查提供依据。方法：回顾性分析 2022 年 1 月至 2025 年 6 月进行胸腰段 CT 扫描的中老年患者 200 例，以双能 X 射线吸收法（DXA）为金标准，将受试者分成骨质疏松组、骨量减少组和正常骨量组，利用能谱 CT 物质分离技术测定松质骨内羟基磷灰石（HAP）-水含量，并比较三组间 HAP 浓度及 70 keV 单能量 CT 值。结果：在骨质疏松症患者中，HAP-水浓度及 70 keV 单能量 CT 值均降低，且均显著降低（ $P < 0.05$ ）；HAP-水含量与 DXA T 值之间存在显著的相关性（ $r = 0.742$ ）；HAP-水含量诊断骨质疏松的 ROC 曲线下面积（AUC）为 0.861。结论：利用能谱 CT 物质分离技术可以实现对胸腰段椎体松质骨 HAP 含量的定量分析，并与 DXA 测定值之间存在较好的相关性，可以用于老年患者的胸腰段椎体骨质疏松的早期筛查。

【关键词】：能谱 CT；物质分离技术；胸腰椎；骨密度；骨质疏松

DOI:10.12417/2705-098X.26.19.065

随着我国人口的不断老化，骨质疏松症（Osteoporosis, OP）已成为老年人群的常见代谢性疾病，而胸腰椎是其最易发生骨折的部位，因此，及早发现骨量下降对预防椎体骨折具有重要意义^[1]。骨质疏松症早期无明显临床症状，患者大多在发生压缩性骨折后才被确诊，骨折后致残率和死亡率均较高，给家庭和社会造成沉重的健康负担^[2]。双能 X 射线吸收法（DXA）是当前临床上最常用的骨密度测量方法，然而 DXA 无法避免椎体骨质增生、骨赘和血管钙化等因素的重叠影响，无法同时显示椎体形态、椎管及周围软组织，导致部分患者因胸腰背部疼痛而再次进行 CT 扫描，这既增加了医疗负担，也增加了检查次数和辐射剂量^[3]。

能谱 CT 物质分离技术利用高、低两种能量的 X 射线衰减特性，将体素分解为羟基磷灰石-水基物质，从而对骨组织中的矿物质含量进行量化，与传统 CT 影像相比，可实现“一次扫描、形态学观察+骨密度量化”^[4]。当前，基层医疗机构对该技术的临床应用认识不足，一些放射科和临床医生只能通过常规 CT 检查来进行定性判断，缺乏量化的客观指标。同时，由于能谱 CT 后处理物质分离标准、靶区勾画要点、本地人群参照数据尚不完善等问题，尚未形成规范化的操作流程^[5]。因此，本研究通过对 200 例中老年患者的诊断资料进行回顾性分析，探索基于能谱 CT 的物质分离技术在骨质疏松筛查中的应用，明确该方法在骨质疏松筛查中的应用价值，总结其质量控制要点，为其临床应用提供参考。

1 资料与方法

1.1 一般资料

回顾性分析 2022 年 1 月至 2025 年 6 月在我院接受胸腰段 CT 扫描，且 3 个月以内进行 DXA 测定的中老年患者 200 例。其中 94 例男性和 106 例女性，年龄范围 50-81 岁，平均（64.8

±7.6）岁。根据 DXA 腰椎 T 值分为三组：骨质疏松组 68 例（ $T \leq -2.5$ ），骨量减少组 72 例（ $-2.5 < T < -1.0$ ），骨量正常组 60 例（ $T \geq -1.0$ ）。女性受检中绝经后妇女共 87 例，占女性总人数 82.1%；部分受检合并高血压、2 型糖尿病、退行性骨关节病等慢性基础疾病。

入选条件：①年龄 ≥ 50 岁；②完成胸腰段能谱 CT 扫描，其图像质量符合后处理要求；③CT 检查前后 3 个月内完成 DXA 测定。④病历及影像资料完整；⑤患者签署知情同意书。

排除条件：①新鲜压缩性骨折、椎体肿瘤、椎体感染；②椎体严重骨质增生或大量骨赘形成，无法准确勾画松质骨 ROI；③有脊柱手术史或椎体成形术史；④重度肾功能不全或长期使用大剂量抗骨质疏松药物；⑤CT 影像中存在严重伪影，无法进行后续分析。三组患者的年龄、性别及基础疾病的构成情况均没有显著差别，具有可比性。

1.2 方法

利用能谱 CT 机对 T10-L3 椎体进行 GSI（宝石能谱成像，Gemstone Spectral Imaging）模式扫描，扫描参数 80 kVp/140 kVp 瞬时切换，机架旋转时间 0.5 秒，重建层厚 1.25 mm，将扫描数据传送到能谱后处理工作站。以羟基磷灰石（HAP）-水为基物质对，采用物质分离程序，得到基物质成分的浓度分布图。选取 T12、L1、L2 椎体的松质骨，避开骨皮质、骨赘、血管钙化、局部病变，ROI 范围（80-120 mm²），测定 3 个椎体的 HAP-水含量（mg/cm³），以及 70 keV 单能量图像上椎体松质骨的 CT 值，取 3 个椎体的平均值作为最终测量值。为了减少人为误差，由 2 名具有 5 年以上工作经验的放射科医师独立进行 ROI 勾画和参数测量，双方互不知晓对方的测量结果及 DXA 结果，取两位医师测量结果的平均值作为最终数据，若两位医师测量差值超过 15 mg/cm³，则共同复核图像后重新测

量。

采用双能 X 射线吸收法 (DXA) 骨密度仪对 L1-L4 段进行测量, 并按设备标准流程进行质量控制。依据 DXA 测量的腰椎 T 数值, 将 $T \leq -2.5$ 判定为骨质疏松症, $-2.5 < T < -1.0$ 判定为骨量减少, $T \geq -1.0$ 则为正常。

1.3 观察指标

①胸腰段的 HAP-水浓度: 利用能谱 CT 物质分离技术测定, 单位 mg/cm^3 , 反映椎体骨矿物质含量。②70 keV 单能量 CT 值: 70 keV 单能量图像上松质骨的 CT 值 (HU)。③相关性分析: 对 HAP-水浓度与 DXA-T 值进行 Pearson 相关分析。④应用 DXA 作为“金标准”, 绘制 HAP-水浓度诊断骨质疏松的 ROC 曲线, 计算 AUC 值。

1.4 统计学处理

通过 SPSS 26.0 统计软件对数据进行处理; 计量资料以 ($\bar{x} \pm s$) 表达, 多组间比较采用单因素方差分析, 组间两两比较进行 LSD-t 检验; 计数资料以百分比表达; 采用 Pearson 相关分析进行相关性检验; 应用 ROC 曲线评价 HAP-水浓度对骨质疏松的诊断效能; 采用组内相关系数 (ICC, Intra-class Correlation Coefficient) 分析法对两位观察者的测量结果进行比较; 以 $\alpha=0.05$ 为检验水准, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 三组 HAP-水基物质对浓度、70keV 单能量 CT 值对比

骨质疏松组 HAP-水浓度、70keV 单能量 CT 值显著低于骨量减少组、骨量正常组, 骨量减少组低于骨量正常组, 组间对比差异均有统计学意义 ($P < 0.05$), 见表 1。

表 1 三组受检者 HAP-水浓度、70keV 单能量 CT 值对比 ($\bar{x} \pm s$)

组别	骨质疏松组	骨量减少组	骨量正常组	F	P
例数	68	72	60	-	-
HAP-水浓度 (mg/cm^3)	84.6 ± 11.2	112.3 ± 13.5	140.5 ± 15.7	186.342	< 0.001
70keV 单能量 CT 值(HU)	62.4 ± 10.3	91.5 ± 12.6	118.2 ± 14.1	162.717	< 0.001

2.2 HAP-水浓度与 DXA-T 值相关性

Pearson 相关性分析显示, 胸腰椎 HAP-水基物质对浓度与 DXA 腰椎 T 值呈正相关 ($r=0.742$, $P < 0.001$), HAP-水浓度越高, DXA-T 值越高。见表 2。

表 2 HAP-水浓度与 DXA-T 值相关性分析

指标	相关系数 r	P 值
HAP-水浓度与 DXA-T 值	0.742	< 0.001

2.3 HAP-水浓度诊断骨质疏松 ROC 分析

以 DXA 诊断骨质疏松作为金标准, HAP-水基物质对浓度 ROC 曲线下面积 $\text{AUC}=0.861$ (95%CI: 0.811-0.912), 最佳临界值 $92.4 \text{ mg}/\text{cm}^3$, 灵敏度 82.4%, 特异度 78.1%, 见表 3。

表 3 HAP-水浓度诊断骨质疏松 ROC 曲线参数

指标	AUC	最佳临界值	灵敏度(%)	特异度(%)
HAP-水浓度	0.861	$92.4 \text{ mg}/\text{cm}^3$	82.4	78.1

2.4 两名医师测量结果一致性

两名放射医师 HAP-水浓度测量的 $\text{ICC}=0.913$, $P < 0.001$, 提示测量一致性良好, 见表 4。

表 4 两名医师测量结果一致性

观察项目	ICC	P
HAP-水浓度	0.913	< 0.001

3 讨论

骨质疏松症 (OP) 是一种以骨量减少和骨微结构损伤为主要特点的代谢疾病, 中老年人是骨质疏松性骨折的高发人群, 若能及早进行干预, 可有效降低致残率。DXA 是骨密度测量的金标准, 但受骨赘、主动脉钙化及终板硬化等因素干扰, 存在假阳性可能, 导致对一些骨质疏松症患者的误诊^[6]。在临床上, 许多中老年人都会因为胸腰背部疼痛而去做胸腰椎 CT, 而传统 CT 仅能通过目测或 ROI 测量进行密度评估, 只能进行定性的诊断, 不能达到对骨质疏松进行客观量化的要求, 无法达到对骨质疏松进行准确诊断的目的^[7]。然而, 这一方法受到靶区勾画、椎体退变、扫描后处理参数及操作人员经验等多种因素的制约, 目前国内尚缺乏统一的 CT 骨密度测量操作规范, 本地人群参照数据尚待进一步积累^[8]。因此, 本研究通过 200 例中老年受试者的 DXA 数据, 评价能谱 CT 物质分离技术对骨密度测定和骨质疏松筛查中的作用, 并归纳出测量过程中的质控要点。

本研究发现, 在骨质疏松症患者中, HAP-水含量 ($84.6 \pm 11.2 \text{ mg}/\text{cm}^3$ 和 70 keV CT (62.4 ± 10.3)HU 均显著降低, 三组间差异有统计学意义 ($F=186.342$, $P < 0.001$)。在骨质疏松发展过程中, HAP-水基物质的含量相应地降低。70 keV 单能量 CT 值也会随着骨质减少而降低, 但常规 CT 扫描易受骨髓内脂肪浸润和局部钙化等干扰, 而基于物质分离技术的 HAP-水测量方法能排除脂肪及软组织干扰, 更特异性地反映骨矿物

质含量,这是比常规CT更具优势的地方^[9]。70 keV单能量CT值可通过能谱后处理工作站获取,操作相对简便,可作为辅助参考指标。HAP-水含量与DXA测定的相关性研究:二者之间存在较强的正相关($r=0.742$, $P<0.001$),表明该方法与DXA的测定具有较好的相关性。但两者原理不同,DXA测量的是面积骨密度,同时还会受到椎体投影面积和骨赘重叠的影响;能谱CT测量的是松质骨HAP浓度(体积骨密度),两种方法的测量原理和物理尺度不同。本研究表明,HAP-水浓度适用于临床上的机会性筛查,但不能与DXA结果直接等同,亦不能取代DXA诊断,对于存在异常的人群,需要进一步进行DXA检查以明确诊断。ROC曲线分析显示,HAP-水浓度诊断骨质疏松的AUC为0.861,阈值为92.4 mg/cm³,灵敏度为82.4%,特异度为78.1%。对已行能谱CT扫描的中老年患者进行机会性骨量筛查;特别是对一些因骨髓和血管钙化而导致诊断存在

疑问的患者,能谱CT可为诊断提供额外依据。对于能谱CT筛查提示骨量异常的患者,建议进一步行DXA检查以明确诊断,避免仅依据能谱CT结果做出诊断^[10]。两位医师测量的ICC值为0.913,表明感兴趣区轮廓的测量具有良好的可重复性。为获得更稳定可靠的数据,需遵循严格的质量控制流程:感兴趣区域要避开骨皮质、骨赘和钙化灶;若两个测量值相差太大,则要一起复查影像再测。建议加强影像技师及诊断医师的后处理培训,减少人工勾画ROI导致的测量错误。

综上,基于能谱CT的物质分离技术能够实现对中老年胸腰段骨组织内羟基磷灰石(HAP)和水成分含量的量化分析,其与DXA测定值之间具有较好的相关性,在骨质疏松筛查中具有一定价值,适用于已具备胸腰椎CT适应证的中老年人进行机会性骨密度评估。

参考文献:

- [1] 陈有,刘敏,王永胜,等.X线、CT、MRI检查对骨质疏松性椎体压缩骨折的诊断价值及其在术后疗效评估中的价值分析[J].中国CT和MRI杂志,2025,23(12):180-182.
- [2] 程启桦,刘义军,王诗耕,等.基于腹部低keV图像的能谱CT影像组学模型评估骨质状态[J].放射学实践,2025,40(4):529-534.
- [3] 童小雨,王旭,李贝贝,等.能谱CT物质分离技术用于机会性骨质疏松筛查的可行性[J].实用放射学杂志,2025,41(1):93-97.
- [4] 宗林雄,黄天俊,孟庆林,等.双层探测器光谱CT能谱衰减曲线斜率用于评价椎体骨密度值的可行性[J].武警医学,2025,36(1):50-54.
- [5] 朱宏,郑雪丽,朱隽奇,等.基于能谱CT物质分离技术对急性和慢性骨质疏松性椎体骨折的定量研究[J].河西学院学报,2024,40(5):9-13.
- [6] 刘慧,顾磊,刘凯,等.基于能谱CT物质定量分析功能对骨密度的测量[J].医学影像学杂志,2024,34(4):99-102.
- [7] 王旭,刘磊,刘义军,等.胸腹部平扫CT值用于机会性筛查骨质疏松的可行性[J].放射学实践,2024,39(3):393-398.
- [8] 姚宁,史郁婷,叶航,等.不同准直器宽度对宝石CT能谱成像测量腰椎骨密度的影响[J].医学影像学杂志,2023,33(10):1873-1877.
- [9] 王洁淼,郑修竹,闫晟,等.基于能谱CT物质分离技术对急性和慢性骨质疏松性椎体骨折的定量研究[J].放射学实践,2023,38(7):937-941.
- [10] 高琬俞,朱新进.双能量CT在评估椎体骨密度中的应用进展[J].中国医学创新,2023,20(14):179-183.