

基于胸部CT机会性筛查的骨质疏松评估研究进展

何娜¹, 李云杰¹, 胡李男^{2*}

¹吉首大学医学院, 湖南 吉首

²吉首大学株洲临床学院放射科, 湖南 株洲

收稿日期: 2026年2月16日; 录用日期: 2026年3月9日; 发布日期: 2026年3月18日

摘要

老年人群骨质疏松症的患病率较高, 但是早期诊断率偏低。依靠常规影像学检查开展骨质疏松的机会性筛查, 有助于实现疾病的早期发现与干预, 减轻社会及医疗负担。双能X线吸收测定法(dual-energy X-ray absorptiometry, DXA)是骨质疏松症诊断的金标准之一, 但是存在测量易受干扰、设备普及率低、患者依从性差等缺点。传统定量CT (quantitative CT, QCT)虽然可以测量体积骨密度, 但是扫描时需要同时放置外部校准模体, 不能对已经完成的常规CT数据进行回顾性分析, 限制了它在机会性筛查中的应用。自体模定量CT (phantomless quantitative CT, 自体模QCT)用体内组织作内参照, 不需要外部校准模体就可以从常规胸部CT中提取骨密度信息, 支持回顾性分析, 是机会性筛查的重要技术途径。胸部CT在中老年人群中应用广泛, 且覆盖有松质骨的胸椎节段, 比腹部CT更具机会性筛查优势。但是以往的研究大多集中在腹部CT上, 胸部CT在节段标准化、诊断阈值本土化及体成分联合评估等方面还缺乏系统性研究。本文对自体模QCT技术原理、测量层面选择、不同技术路径比较以及体成分联合评估的潜在价值进行了系统的梳理, 确定了T11、T12椎体作为测量节段的可行性, 提出了“骨密度-肌肉-脂肪”联合评估的策略。未来急需开展以中国人群为对象的多中心研究来建立胸部CT机会性筛查的诊断阈值, 推动自动化分析工具的开发, 把机会性筛查纳入到骨质疏松的防治指南中, 实现大规模早期筛查和综合健康管理。

关键词

骨质疏松, 机会性筛查, 胸部CT, 定量CT, 体积骨密度, 椎体骨密度

Research Progress in Osteoporosis Assessment Based on Opportunistic Screening with Chest CT

Na He¹, Yunjie Li¹, Linan Hu^{2*}

*通讯作者。

文章引用: 何娜, 李云杰, 胡李男. 基于胸部 CT 机会性筛查的骨质疏松评估研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(3): 3233-3242. DOI: 10.12677/acm.2026.1631129

¹School of Medicine, Jishou University, Jishou Hunan²Department of Radiology, Zhuzhou Clinical College of Jishou University, Zhuzhou Hunan

Received: February 16, 2026; accepted: March 9, 2026; published: March 18, 2026

Abstract

Osteoporosis is highly prevalent in older adults, yet early detection rates remain suboptimal. Opportunistic screening for osteoporosis using routine imaging examinations may enable earlier identification and intervention, thereby alleviating societal and healthcare burdens. Dual-energy X-ray absorptiometry (DXA), one of the diagnostic gold standards for osteoporosis, has notable limitations, including susceptibility to measurement artifacts, limited equipment availability, and poor patient adherence. Although conventional quantitative computed tomography (QCT) can quantify volumetric bone mineral density (vBMD), it requires the concurrent placement of an external calibration phantom during scanning and therefore cannot be applied retrospectively to previously acquired routine CT data, which restricts its utility for opportunistic screening. Phantomless quantitative CT (phantomless QCT; internal-calibration QCT) uses in vivo tissues as internal references, allowing bone density information to be extracted from routine chest CT without an external phantom and enabling retrospective analyses; thus, it represents an important technical approach for opportunistic screening. Chest CT is widely performed in middle-aged and older populations and covers thoracic vertebral segments rich in trabecular bone, offering advantages over abdominal CT for opportunistic screening. However, prior studies have largely focused on abdominal CT, and systematic research on chest CT remains limited with respect to standardized vertebral level selection, localization of diagnostic thresholds, and integrated assessment with body composition. This review systematically summarizes the principles of phantomless QCT, measurement level selection, comparisons among technical pathways, and the potential value of combined body composition assessment. We confirm the feasibility of using the T11 and T12 vertebral bodies as measurement levels and propose a “bone density-muscle-fat” integrated evaluation strategy. Future multicenter studies in Chinese populations are urgently needed to establish diagnostic thresholds for chest CT-based opportunistic screening, accelerate the development of automated analysis tools, and incorporate opportunistic screening into osteoporosis prevention and management guidelines to enable large-scale early screening and comprehensive health management.

Keywords

Osteoporosis, Opportunistic Screening, Chest CT, Quantitative Computed Tomography, Volumetric Bone Mineral Density, Vertebral Bone Mineral Density

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

我国 50 岁以上人群骨质疏松患病率约为 19.2%至 32.1%，已成为影响老年人群健康的重要公共卫生问题，该疾病会显著增加脆性骨折发生风险[1]。因为骨质疏松在早期阶段没有明显的特异性症状，患者一般只有在发生脆性骨折之后才会被确诊，此时已经造成了不同程度的功能障碍和生活质量的降低，同时还会加重长期医疗和社会照护的负担。因此，在骨折发生前就做好有效的早期筛查和风险识别，被看

作是减少骨折发生率、改善患者预后及减轻社会负担的重要环节。目前,双能 X 线吸收测定法(dual-energy X-ray absorptiometry, DXA)是骨质疏松诊断的金标准之一。但是 DXA 测量的是面积骨密度,容易受到椎体退变、血管钙化、体型差异等因素的影响,存在一定漏诊的风险;同时,DXA 设备成本较高,在基层医疗机构的普及程度较低,需要患者专门去医院检查,降低了患者的依从性,这些局限性使得相当一部分骨质疏松高危人群没有及时发现[2]。

在这个背景之下,机会性筛查作为新兴的骨质疏松筛查策略出现。机会性筛查的核心思想就是利用患者因其他临床适应症(如肺癌筛查或者健康体检)已经完成的影像学检查资料,在保证不增加额外的检查、辐射剂量和经济负担的情况下,同时评价骨质疏松的风险[3],达成“一次检查,双重获益”。此策略可以早期发现高危人群,在无症状阶段识别出高危个体,给早期干预提供窗口期,适合中老年人群的大规模筛查。常规 CT 检查中,胸部 CT 相对于腹部 CT 在机会性筛查方面具有更明显的优势。胸部 CT 在肺癌筛查及健康体检中应用频率较高,扫描范围可以覆盖富含松质骨的下胸椎节段(T11、T12),不需要额外的检查准备,患者依从性好。传统定量 CT (quantitative computed tomography, QCT)可以测量椎体体积骨密度(volumetric bone mineral density, vBMD),区分皮质骨和松质骨成分,但是由于其需要同步放置外部校准模体的技术要求,限制了它在常规 CT 检查中的应用,也使得它难以对已经完成的大量胸部 CT 数据进行回顾性分析,从而限制了它在机会性筛查中的推广。

自体模定量 CT (phantomless quantitative CT, 自体模 QCT)技术的提出给解决上述问题提供了一条新的技术途径。该技术选择体内相对稳定的组织(椎旁肌肉、皮下脂肪、脑脊液或者气管内空气)作为内参照,建立校准模型,将 CT 值转换为骨密度数值,不需要外部校准模体就可以实现常规 CT 图像的骨密度定量分析,从而支持回顾性研究和机会性筛查。既往研究已经初步证实了自体模 QCT 在骨密度评估方面的可行性,但是针对胸部 CT 这一具有更广泛临床应用价值的机会性筛查应用场景,在椎体测量节段的标准化选择(T11、T12 和 L1、L2 等效性)、诊断阈值的人群和设备差异验证、体成分因素对测量结果的影响等方面,仍然缺乏系统的研究和统一的认识[4]。因此本文系统综述基于自体模 QCT 技术的胸部 CT 机会性筛查在椎体骨密度定量评估中的研究进展,主要总结技术原理、测量方法、诊断效能、体成分联合评估的潜在价值,分析目前存在的问题和挑战,为该技术的标准化应用和临床推广提供理论依据和实践参考。

2. 骨质疏松的影像诊断与骨密度定量方法

DXA 用高低两种能量的 X 线对人体进行扫描来测量骨密度,是目前应用最广、认可度最高的骨密度测量方法。但是其测量出的面积骨密度属于二维投影值,对于合并退行性改变的患者,椎体骨赘形成、韧带骨化、血管钙化等因素都会使测量结果偏高,从而掩盖真实的骨量丢失情况[5],影响诊断准确性。此外,DXA 设备成本比较高,在基层医疗机构还没有得到广泛普及,这限制了其在大规模人群筛查中的应用[6]。根据以上局限,以 CT 为基础的骨密度定量技术由于可以进行三维体积测量,因此逐渐成为 DXA 的重要补充。相比 DXA,胸部 CT 设备在各级医疗机构中配置更为普遍,为骨质疏松机会性筛查提供了良好的设备基础。

传统 QCT 技术借助外部校准模体来构建 CT 值与骨密度之间的转换关系,其计算公式是: $BMD = [(Hb - Hw)/(Hk - Hw)] \times Ck$, 其中 Hb 为感兴趣区(region of interest, ROI)内松质骨的 CT 值, Hw 为水模 CT 值, Hk 为骨模 CT 值, Ck 为标准模体中羟基磷灰石浓度,单位为 mg/cm^3 。与 DXA 获得的面积骨密度不同, QCT 测量的是体积骨密度,属于真实的三维密度指标,不受椎体大小和形态差异影响,从测量原理上弥补了 DXA 二维投影的不足[7]。由于松质骨的代谢活性显著高于皮质骨[7], QCT 可以分别测量两者的骨密度,对早期骨量丢失的敏感性比 DXA 高,因此理论上比 DXA 更具有优势。但是传统的 QCT

在扫描过程中需要同时放置外部校准模体, 模体摆放位置、扫描参数以及设备差异都会带来系统误差, 而且不能对以前完成的常规 CT 图像进行回顾性分析[8], 从而限制了其在胸部 CT 机会性筛查中的实际应用。

为克服传统 QCT 的上述不足并满足常规胸部 CT 机会性筛查的要求, 自体模 QCT 技术应运而生。该技术通过选择患者体内相对稳定的组织, 比如椎旁肌肉、皮下脂肪、椎管内脑脊液或者气管内空气等作为内参照来建立校准模型, 不需要外部模体就可以把 CT 值转变成骨密度值[9], 从而实现对常规胸部 CT 图像的骨密度定量分析。依靠构建内参照组织 CT 值与骨密度的转换算法, 常规 CT 用于骨密度测量的误差一般控制在 5%~10% [10]。自体模 QCT 可以应用到胸部 CT 的既定检查流程当中, 不需要改变扫描方案, 也不增加辐射剂量或者检查费用, 使得患者在进行肺癌筛查或者健康体检的时候, 也能得到骨质疏松风险的评估, 从而实现影像信息的综合利用。该技术可以对以前存档的图像进行回顾性的分析, 给大样本研究以及高危人群的识别提供重要的数据基础。胸部 CT 覆盖的 T11、T12 椎体松质骨含量丰富、代谢活跃, 是自体模 QCT 测量骨密度的最佳部位。尽管该技术在算法统一性以及多中心验证方面还须进一步完善, 但是由于其便捷性、经济性以及较高的可推广性, 自体模 QCT 已经成为了目前胸部 CT 机会性筛查中应用潜力最大的骨密度定量方法之一。

3. 胸部 CT 机会性筛查的可行性与测量部位选择

胸部 CT 在肺癌筛查、健康体检、多种肺部疾病诊疗和随访等都有应用, 为骨质疏松机会性筛查提供了现实基础, 大量的常规胸部 CT 检查数据可以作为潜在的筛查资源。从解剖学的角度来说, 常规胸部 CT 扫描范围一般包括 T11、T12 椎体, 在不增加辐射剂量、经济负担和检查流程复杂度的前提下, 可以同时进行椎体骨密度的评估[11]。胸部 CT 检查频率高于腹部 CT, 胸椎中、下段松质骨含量多、代谢活性高, 对早期骨量丢失比较敏感。因此胸部 CT 被认为是开展骨质疏松机会性筛查的理想切入点, 尤其适合于需要长期接受胸部 CT 随访的慢性阻塞性肺疾病等呼吸系统疾病患者, 可以在一次检查中实现多种临床信息的综合利用[12]。

在确定胸部 CT 有开展机会性筛查的可能性之后, 选择合适的椎体层面对于筛查结果标准化和诊断效能有着重要的影响。椎体测量层面的选择要综合考虑 CT 扫描覆盖范围和不同的椎体骨密度代表性。

《定量 CT 在健康管理中的应用指南》提出, 用外部模体的传统 QCT 测量骨密度时, 以 L1、L2 椎体松质骨平均体积骨密度作为诊断依据[3]。但是常规胸部 CT 扫描中 L1 椎体大多为部分显示, L2 椎体完整显示的情况较少, 直接使用腰椎测量方案存在一定的局限性。因此, 以胸部 CT 为机会性筛查的手段, T11、T12 椎体作为测量层面更适合优先选择。研究显示不同的椎体节段之间, 体积骨密度(volumetric bone mineral density, vBMD)之间存在高相关性, 胸椎和腰椎骨密度之间有很好的吻合性。一项包含 260 例患者的研究所发现的 T12 椎体 vBMD 与 L1-L3 均值之间 Pearson 相关系数高达 0.96, 对应骨质疏松诊断阈值差异不足 5% [13]。另一项针对 300 例同时接受胸腹部 CT 扫描患者的研究亦显示, 胸椎与 L1-L3 的 vBMD 高度相关(女性 $r = 0.91$, 男性 $r = 0.93$), 尽管胸椎 vBMD 略高于腰椎(女性 156.9 vs 141.9 mg/cm^3 , 男性 164.8 vs 151.0 mg/cm^3) [14], 但整体一致性良好。此外, 基于 CT 图像的逐椎分析结果表明, T11 至 L2 区间各椎体间的 BMD 差异无统计学差异[15]。关于诊断效能, 有研究显示 T11-L2 区对椎体骨折的预测效能最好(AUC = 0.75), 在该区使用 80 mg/cm^3 作为阈值时, 其敏感度可达 85%~88%, 与 L1-L4 水平相当[16]。在建立适当的转换系数之后, T11、T12 椎体骨密度测量结果在一定程度上可以代替腰椎用于临床评估。

在具体测量过程中, 标准化的感兴趣区(ROI)的放置对于保证测量的重复性、可靠性来说是十分重要的。椎体 ROI 放置一般选择椎体中部层面, 用椭圆形 ROI 覆盖松质骨区, 覆盖比例不低于 80%, 与皮质

骨内缘保持 3~5 mm 距离,不能包含椎静脉丛、钙化结节等干扰结构。每个椎体应该测量至少 3 个连续的层面,然后取其平均值。研究显示人工 ROI 放在不同的操作者之间变异系数可以达到 8%~15%,这一局限性推动了自动化测量技术的发展。近几年来,深度学习技术飞速发展,给手动测量效率低、一致性差的问题提供了解决途径,基于人工智能的自动化分析流程包含椎体自动定位与标记、椎体轮廓自动分割、松质骨 ROI 自动提取、骨密度自动定量等。

基于全卷积神经网络的迭代式分割算法在不同的扫描协议下逐一定位、分割、标记椎体,在包含低剂量胸部 CT 在内的多个数据集上分割 Dice 系数达到 94.9%,解剖标记准确率达到 93% [17]。在大规模椎体分割基准测试中,有 25 种全自动算法在 374 例多探测器 CT 上进行评价。最佳算法椎体识别率 96.6%,Dice 系数 91.7% [18],说明基于深度学习的椎体分割技术精度高、跨数据集泛化能力强。在完成椎体轮廓分割之后,通过形态学腐蚀或距离变换方法自动剥离皮质骨、提取松质骨 ROI,研究表明自动化骨密度测量与资深医师手动测量之间具有良好的一致性(Pearson 相关系数 >0.95 , ICC >0.97),在椎体骨折鉴别中 AUC 可达 0.862 [19],显著优于手动测量的效率和重复性。除此之外,有部分研究试图创建起直接从 CT 图像输出骨质疏松风险分类的端到端模型,用 QCT 骨密度作为参照标准时诊断 AUC 可以达到 0.97 以上,但是用 DXA 作为参照标准时诊断效能会降低(AUC 约为 0.77~0.79 [20]),模型的可解释性以及临床接受度还需要进一步的验证。

尽管 AI 技术有着不错的应用前景,但 AI 在临床落地时仍然存在困难:多数算法是在单中心数据的基础上进行训练的,跨设备、跨人群的泛化能力还需要通过多中心的外部验证来进一步提升;对异常椎体形态(如严重压缩骨折、术后内固定物)的鲁棒性也需要进一步提高;AI 辅助骨密度测量的质量控制标准和监管审批也需要进一步明确。未来应该建立大规模的多中心标注数据集,开发出既准确又可解释的模型,逐步建立临床应用规范,为基于 T11、T12 椎体的胸部 CT 机会性筛查大规模推广应用奠定基础。

4. 胸部 CT 骨密度定量方法与诊断阈值

椎体骨密度定量分析技术路线的选择要兼顾操作方便性、测量准确性、临床可行性三者的平衡。不同的技术路径在胸部 CT 机会性筛查中的适用性以及对应的诊断阈值是不一样的。根据是否使用外部校准模体,CT 骨密度定量方法可以分为同步模体 QCT、自体模 QCT 和异步校准 QCT。自体模 QCT 由于不需要额外的扫描条件,可以对以前完成的常规胸部 CT 图像进行回顾性分析,被认为是最符合胸部 CT 机会性筛查需求的技术路径之一。

HU 值直读法是直接测量椎体松质骨区域的 Hounsfield 单位(HU)值来评价骨质疏松的风险,不需要另外的设备或者复杂的后处理。既往研究中 HU 阈值存在一定的差异,一般认为 HU 值在 110 到 135 之间表示低骨量,小于 110 HU 表示存在骨质疏松的风险[21]。该方法操作简便、成本低,适合于大规模人群的快速初筛。但是 HU 值本质上是 X 线衰减系数的相对指标,容易受到扫描电压、重建层厚、重建算法、扫描仪型号、设备校准状态等众多因素的影响,不同设备和扫描方案之间的测量结果可比性较差[3]。因此,在胸部 CT 机会性筛查中,HU 值直读法更适合做初步的风险分层工具,用来识别高危个体并触发进一步的评估,不能作为独立的诊断依据。

传统的 QCT 扫描过程中会同时放上羟基磷灰石外部校准模体,把 HU 值转换为标准化的体积骨密度(vBMD),是传统 CT 骨密度测量的参考标准。在中国《定量 CT 在健康管理中的应用指南》中,明确提出以 $vBMD > 120 \text{ mg/cm}^3$ 定为骨量正常, $80 \sim 120 \text{ mg/cm}^3$ 为低骨量, $vBMD < 80 \text{ mg/cm}^3$ 为骨质疏松,如果同时合并脆性骨折则诊断为严重骨质疏松[3]。此方法有高准确性和高重复性,属于诊断确认的金标准,但是由于扫描时需要同步放置外部模体这一要求,不能用于已经完成的常规胸部 CT 图像的回顾性分析,不适用于胸部 CT 机会性筛查,只能作为筛查后的诊断确认手段,同步模体 QCT 的局限性也说明了自体

模 QCT 在机会性筛查中不可替代。

自体模 QCT 把患者体内组织当作内参照物, 建立 HU 值和骨密度之间的转换算法, 常见的有肌肉参照法、脂肪 - 空气双参照法等。与同步模体 QCT 相比, 误差一般在 5%~10% 之间[10] [22], 但是各种算法的标准化程度以及跨机型可比较性存在差异, 目前没有统一的诊断阈值标准。自体模 QCT 相比同步模体 QCT 和异步校准 QCT, 最突出的优势就是可以直接应用于以前存档的常规胸部 CT 图像, 不需要改变扫描流程, 适合大规模机会性筛查。目前的研究重点为基于中国人群建立可靠的诊断阈值, 并系统评价不同算法在多中心、多设备条件下的临床适用性。

异步校准 QCT 作为介于同步模体 QCT 和自体模 QCT 之间的折中方案, 利用外部模体定期对 CT 设备进行预校准, 建立一个长期稳定的转换函数供以后扫描使用。该方法适合于前瞻性临床常规扫描, 在胸部 CT 机会性筛查中可以作为替代方案, 但是需要完善的质量控制体系, 在设备升级或者维护后需要及时重新校准, 以保证跨时间测量结果的一致性。

根据不同的技术途径特点, 在实际应用中要根据具体的临床情况选择测量方法。由于松质骨代谢更新快, 所以体积骨密度对于早期骨量丢失更加敏感。HU 值转 vBMD 的准确度取决于校准模型的线性拟合, 不同扫描参数下, 不同组织的 CT 值与骨密度之间的线性关系不同, 因此需要按照不同的扫描方案来校准并验证自体模 QCT 算法。已有研究表明, 在骨质疏松性椎体压缩骨折的风险评估中, 将皮质骨和松质骨参数综合起来, 可以取得更好的预测效果[23]。另外, 基于外部模体的 QCT 与 DXA 在诊断结果上的一致性处于中等到良好的水平, 但是由于两者测量原理不同, 诊断分类中还存在一定的系统性偏差。针对胸部 CT 机会性筛查, 建议采取“HU 值初筛 - 自体模 QCT 定量评估 - 金标准方法确认”的分层筛查策略, 根据医疗机构条件及患者个体情况选择合适的筛查技术路径。

5. CT 扫描条件对骨密度定量精度的影响与校正策略

自体模 QCT 的骨密度转换精度很大程度上受扫描条件的影响, 弄清各因素的影响机制并建立校正方法, 是保证胸部 CT 机会性筛查测量结果可靠性和跨机构可比性的前提。

在各种扫描参数中, 管电压(kVp)对 HU 值的影响最大。管电压降低, X 线光子平均能量下降, 光电效应比例增加, 含钙组织衰减系数相对升高。研究表明, 80 kVp 与 120 kVp 之间椎体松质骨 HU 值差异约为 23%, 80 kVp 与 140 kVp 之间差异可达 65% [24], 若不加校正会造成骨密度的系统性高估, 降低骨质疏松的检出率。目前胸部低剂量 CT 筛查多采用 100 kVp 或 120 kVp 方案, 不同方案之间 HU 值差异要求针对不同管电压分别建立或校正转换方程。管电流(mAs)影响图像噪声水平, 低 mAs 图像噪声增大, 增大 ROI 面积和多层面取均值可以在一定程度上降低噪声影响, 低 mAs 条件下图像噪声增大, ROI 测量的随机误差和重复性均降低。重建层厚方面, 较薄层厚虽能减少部分容积效应, 但会增加噪声, 较厚层厚则因部分容积效应使 HU 值偏低, 重建核的选择也不可忽视, 骨算法重建核会使骨组织 HU 值偏高, 软组织算法则会使 HU 值偏低, 一项比较 8 种重建核的研究表明, 最平滑核与最尖锐核之间椎体 HU 值的差异可达 10% 以上[25], 建议在机会性筛查中统一使用软组织重建核进行骨密度分析, 不同扫描参数的变化往往是一起出现的, 有研究报道同一患者在不同扫描方案下 L1 椎体 HU 值的综合测量偏差均值可达 27.5 HU [26], 也进一步说明了扫描条件标准化的重要性。

除扫描参数外, 增强 CT 中碘造影剂的使用也是另一个干扰因素。静脉注射的碘造影剂会在椎体松质骨内的血管和骨髓间隙分布, 使松质骨区域 HU 值升高。研究报道造影剂引起椎体 HU 值偏差约为 10~25 HU [27], 该偏差足以改变部分患者的骨量分类, 尤其是骨密度接近诊断阈值的患者。在临床实际中, 相当一部分胸部 CT 是增强扫描(如肺结节、纵隔病变), 如果不校正造影剂影响, 将降低机会性筛查的诊断准确性。已有研究提出以血管内碘浓度作为替代指标的线性回归校正模型, 通过测量主动脉或门

静脉 HU 值校正椎体骨密度测量值[28], 但校正模型的稳定性及普适性仍需进一步验证。

针对上述干扰因素, 目前存在多种校正策略。自体模 QCT 本身具有一定的校正能力, 因为内参照组织和目标组织在同一扫描条件下获取, 参数变化对两者的影响可部分相互抵消, 但抵消程度取决于不同组织对能量变化的响应差异, 不能完全消除系统偏差。双能 CT (dual-energy CT, DECT) 虚拟平扫(virtual unenhanced, VUE)技术通过双能量数据的物质分离算法去除碘造影剂的影响, 生成虚拟去碘图像。研究表明, VUE 图像的椎体 HU 值与真实平扫存在一定的系统性低估, 但两者之间存在强线性相关性, 且利用 VUE 图像进行骨密度评估和骨质疏松诊断具有良好的效能[29], 为 CT 的机会性筛查应用提供了新思路。基于深度学习的自动化框架已经实现了对造影剂相位的自动校正, 在跨重建核、跨扫描仪的多中心验证中具有较好的测量重复性[30], 为 CT 骨密度分析的标准化提供了新的技术手段。

综上, 在推进胸部 CT 机会性筛查标准化应用时, 有必要在多中心研究中系统评估不同扫描条件下自体模 QCT 算法的测量偏差, 建立针对管电压、重建核和造影剂的校正方案, 并积极探索 DECT 虚拟平扫等新技术的临床应用价值。

6. 基于胸部 CT 的体成分与骨密度联合评估价值

体成分指的是人体骨骼、肌肉、脂肪等组织的组成以及它们在空间上的分布情况, 是体现机体代谢和功能状况的重要指标。这些组织不是彼此独立的, 而是通过内分泌、旁分泌以及机械负荷等诸多途径构成相互作用网络, 同骨质疏松和骨折风险有着密切联系。肌肉通过机械牵拉刺激骨形成, 脂肪组织分泌的各种脂肪因子可以调节骨代谢, 骨组织本身也被认为具有内分泌功能。只依靠骨密度来评价, 会忽略多组织之间的相互作用, 从而低估个体真实的骨折风险。基于 CT 的定量分析技术具有一次扫描就可以同时获取骨密度、肌肉质量、脂肪分布等多维信息的优点, 自体模 QCT 的应用使得这一多参数评价模式可以直接整合到常规胸部 CT 检查流程中, 不需要额外扫描, 为综合风险评估提供技术基础[31]。

体成分和骨密度之间相互影响, 其中肌肉组织起着非常重要的作用。肌少症和骨质疏松症常常同时出现, 统称为“骨肌衰老综合征”, 二者主要通过以下三种机制相互耦联: (1) 机械耦联: 肌肉量减少使骨骼承受的机械负荷下降, 抑制骨形成; (2) 内分泌耦联: 骨骼肌和骨组织可以分泌多种细胞因子, 通过“骨肌串话”调控彼此的代谢活动; (3) 代谢耦联: 肌肉减少常伴有胰岛素抵抗和慢性炎症状态, 加速骨代谢失衡[32]。根据以上机制, 单纯评价骨密度不能完全体现骨折的风险, 临床研究也证实, 合并肌少症的患者发生骨质疏松性椎体压缩性骨折的风险明显增加, 说明肌肉和骨骼的协同退变在骨折发生机制中起着重要的作用[33]。

除了肌肉以外, 脂肪组织尤其是内脏脂肪对于骨代谢也有着重要的影响。胸部 CT 可以在 T11、T12 层面上同时得到内脏脂肪面积(visceral adipose tissue, VAT)和皮下脂肪面积(subcutaneous adipose tissue, SAT), 这两种脂肪组织的代谢活性及对骨代谢的影响是不一样的。现有研究认为, VAT 是代谢活跃的组织, 会分泌 IL-6、TNF- α 等促炎因子, 使破骨细胞活性增强, 成骨细胞分化受到抑制, 与椎体体积骨密度呈负相关[34], 是骨质疏松的独立危险因素。相比之下, SAT 对骨密度的影响尚存在争议。一项针对中国女性的研究发现, 校正 BMI 和年龄后, SAT 与腰椎 BMD 无显著关联[35]。然而, 另一项上海人群的研究报告指出, SAT 与 L1-4 及股骨颈 BMD 呈负相关($\beta = -0.074, P < 0.001$), 说明过多的皮下脂肪会通过系统性炎症途径损害骨健康[36]。除此之外, 在肥胖青少年中, 研究发现 SAT 对男孩的骨密度有保护作用, 可能与机械负荷效应以及脂肪因子调节有关, 说明 SAT 对骨代谢的影响具有年龄和性别特异性[37]。差异可能和研究对象的种族、性别、年龄阶段、代谢表型、脂肪分布测量方法等有关。因此, 在临床应用中更合理的策略就是综合评估 VAT、SAT 以及它们的比值等多脂肪指标, 而不是只依赖单一参数。

总体而言, 单一的骨密度指标不能全面反映肌肉骨骼系统的整体情况, 容易漏掉骨密度正常但合并

有肌少症或者内脏脂肪堆积的高危个体。将肌肉质量、脂肪分布等体成分指标加入联合评价,可以改善骨质疏松和骨折风险筛查的敏感性与特异性。基于自体模 QCT 的胸部 CT 机会性筛查可以实现骨密度和体成分的“一站式”定量评估,支持建立多参数联合评估模型,在老年人群骨肌健康综合评价中具有较高的应用潜力[34]。胸部 CT 机会性筛查可同时获得骨密度(椎体 vBMD)、肌肉质量(椎旁肌肉面积及密度)和脂肪分布(VAT、SAT 及 VAT/SAT 比值)等多维体成分信息,建立一个“骨密度-肌肉-脂肪”联合风险评估系统,将单一骨骼评估拓展为综合性骨肌健康管理,从而提高老年人群多病共存风险的识别效能,为精准干预提供依据。

7. 讨论与结论

胸部 CT 机会性筛查在骨质疏松临床应用中还存在着一些亟待解决的问题,主要集中于技术标准化、诊断阈值适用性、生物学机制认识以及临床实施路径等方面。

在技术标准化方面,不同的研究在椎体测量节段的选择以及分析的方法上还存在着差别。现有的证据表明,T11、T12 椎体作为胸部 CT 机会性筛查测量部位的可行性是可以被证实的,但是和传统腰椎测量方案的等效性还需要前瞻性、多中心的研究来证明。自体模 QCT 还没有统一的诊断标准,不同的算法、人群体成分特征、CT 设备差异都会影响测量结果的一致性。因此有必要在中国人群中开展多中心研究,结合临床结局,逐步建立适用于胸部 CT 机会性筛查的诊断阈值体系。

从生物学机制上来说,肌肉、脂肪等体成分因素在骨质疏松发生发展过程中已经引起了人们的注意,但是它们之间的相互作用机制还值得进一步研究。在临床实施层面,目前测量流程对人工操作的依赖程度较高,限制了机会性筛查在大规模人群中的推广,测量流程的自动化和智能化是未来发展的重要方向。

综合现有的研究,以自体模 QCT 为基础的胸部 CT 机会性筛查,可以充分利用常规影像资源,实现骨密度和体成分的同步评价。本文对本技术的研究进展进行了系统的梳理,论证了 T11、T12 椎体作为测量部位的可行性,提出了将骨密度评估拓展为“骨密度-肌肉-脂肪”联合评估的思路,以期给临床风险评估提供更加全面的信息。

需要指出的是,本综述仍存在一定的局限性,纳入的研究以回顾性研究为主,前瞻性证据较少,不同自体模算法之间的比较还有待进一步深入。总体来说,以自体模 QCT 技术为基础的胸部 CT 机会性筛查成为骨质疏松早期识别的一种具有临床可行性的补充方法。随着诊断阈值逐步明确、自动化分析技术的发展和临床应用经验的积累,该方法在骨质疏松早期风险识别及综合管理中将发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 于龙,王亮.老年骨质疏松症现状及进展[J].中国临床保健杂志,2022,25(1):6-11.
- [2] 国家骨科医学中心,中国医学装备协会放射影像装备分会,中华医学会放射学分会骨关节学组,等.骨密度装备质量控制与应用专家共识[J].中华放射学杂志,2024,58(4):381-387.
- [3] 中华医学会健康管理学分会,国家骨科医学中心(首都医科大学附属北京积水潭医院),国家级放射影像专业质控中心,等.定量CT在健康管理中的应用指南(2024)[J].中华健康管理学杂志,2024,18(9):645-654.
- [4] Martel, D., Monga, A. and Chang, G. (2022) Osteoporosis Imaging. *Radiologic Clinics of North America*, **60**, 537-545. <https://doi.org/10.1016/j.rcl.2022.02.003>
- [5] Pennington, Z., Ehresman, J., Lubelski, D., Cottrill, E., Schilling, A., Ahmed, A.K., et al. (2021) Assessing Underlying Bone Quality in Spine Surgery Patients: A Narrative Review of Dual-Energy X-Ray Absorptiometry (DXA) and Alternatives. *The Spine Journal*, **21**, 321-331. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2020.08.020>
- [6] Anupama, S., Lim, S.Y. and Bolster, M.B. (2025) Updates on the Role of DXA in the Evaluation and Monitoring of Osteoporosis. *Current Rheumatology Reports*, **27**, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s11926-025-01205-9>
- [7] Cheng, X., Wang, L., Blake, G.M. and Guglielmi, G. (2024) Update on Quantitative Computed Tomography. *Seminars in Musculoskeletal Radiology*, **28**, 557-559. <https://doi.org/10.1055/s-0044-1788694>

- [8] Chen, M., Gerges, M., Raynor, W.Y., Park, P.S.U., Nguyen, E., Chan, D.H., *et al.* (2024) State of the Art Imaging of Osteoporosis. *Seminars in Nuclear Medicine*, **54**, 415-426. <https://doi.org/10.1053/j.semnucmed.2023.10.008>
- [9] 冯磊, 王威, 陈连香. 影像学检查技术在骨质疏松症诊断中的应用进展[J]. 山东医药, 2024, 64(27): 107-111.
- [10] 刘梦珂, 秦健, 李长勤. CT 及 MRI 对骨质疏松的定量研究进展[J]. 中国矫形外科杂志, 2020, 28(21): 1972-1975.
- [11] Engelke, K., Chaudry, O. and Bartenschlager, S. (2023) Opportunistic Screening Techniques for Analysis of CT Scans. *Current Osteoporosis Reports*, **21**, 65-76. <https://doi.org/10.1007/s11914-022-00764-5>
- [12] Aggarwal, V., Maslen, C., Abel, R.L., Bhattacharya, P., Bromiley, P.A., Clark, E.M., *et al.* (2021) Opportunistic Diagnosis of Osteoporosis, Fragile Bone Strength and Vertebral Fractures from Routine CT Scans; a Review of Approved Technology Systems and Pathways to Implementation. *Therapeutic Advances in Musculoskeletal Disease*, **13**, Article 1759720x211024029. <https://doi.org/10.1177/1759720x211024029>
- [13] Rühling, S., Scharr, A., Sollmann, N., Wostrack, M., Löffler, M.T., Menze, B., *et al.* (2022) Proposed Diagnostic Volumetric Bone Mineral Density Thresholds for Osteoporosis and Osteopenia at the Cervicothoracic Spine in Correlation to the Lumbar Spine. *European Radiology*, **32**, 6207-6214. <https://doi.org/10.1007/s00330-022-08721-7>
- [14] Budoff, M.J., Khairallah, W., Li, D., Gao, Y.L., Ismaeel, H., Flores, F., *et al.* (2012) Trabecular Bone Mineral Density Measurement Using Thoracic and Lumbar Quantitative Computed Tomography. *Academic Radiology*, **19**, 179-183. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2011.10.006>
- [15] Hayashi, T., Chen, H., Miyamoto, K., Zhou, X., Hara, T., Yokoyama, R., *et al.* (2010) Analysis of Bone Mineral Density Distribution at Trabecular Bones in Thoracic and Lumbar Vertebrae Using X-Ray CT Images. *Journal of Bone and Mineral Metabolism*, **29**, 174-185. <https://doi.org/10.1007/s00774-010-0204-1>
- [16] Diekmeyer, M., Löffler, M.T., El Hussein, M., Sekuboyina, A., Menze, B., Sollmann, N., *et al.* (2022) Level-Specific Volumetric BMD Threshold Values for the Prediction of Incident Vertebral Fractures Using Opportunistic QCT: A Case-Control Study. *Frontiers in Endocrinology*, **13**, Article 882163. <https://doi.org/10.3389/fendo.2022.882163>
- [17] Lessmann, N., van Ginneken, B., de Jong, P.A. and Išgum, I. (2019) Iterative Fully Convolutional Neural Networks for Automatic Vertebra Segmentation and Identification. *Medical Image Analysis*, **53**, 142-155. <https://doi.org/10.1016/j.media.2019.02.005>
- [18] Sekuboyina, A., Hussein, M.E., Bayat, A., Löffler, M., Liebl, H., Li, H., *et al.* (2021) Verse: A Vertebrae Labelling and Segmentation Benchmark for Multi-Detector CT Images. *Medical Image Analysis*, **73**, Article 102166. <https://doi.org/10.1016/j.media.2021.102166>
- [19] Sollmann, N., Löffler, M.T., El Hussein, M., Sekuboyina, A., Diekmeyer, M., Rühling, S., *et al.* (2020) Automated Opportunistic Osteoporosis Screening in Routine Computed Tomography of the Spine: Comparison with Dedicated Quantitative CT. *Journal of Bone and Mineral Research*, **37**, 1287-1296. <https://doi.org/10.1002/jbmr.4575>
- [20] Park, H., Kang, W.Y., Woo, O.H., Lee, J., Yang, Z. and Oh, S. (2024) Automated Deep Learning-Based Bone Mineral Density Assessment for Opportunistic Osteoporosis Screening Using Various CT Protocols with Multi-Vendor Scanners. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 25014. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73709-w>
- [21] 周科, 廖冬发, 夏宁, 等. 椎体 CT 值评估骨密度及诊断骨质疏松研究进展[J]. 临床军医杂志, 2025, 53(2): 209-214.
- [22] Waqar, A., Bazzocchi, A. and Aparisi Gómez, M.P. (2025) Phantomless Estimation of Bone Mineral Density on Computed Tomography: A Scoping Review. *RöFo—Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren*, **197**, 1262-1278. <https://doi.org/10.1055/a-2530-7790>
- [23] 黄敏华, 叶志锋, 刘志伟, 等. DXA,QCT,DECT 应用于骨质疏松性椎体压缩性骨折内固定治疗的研究进展[J]. 广东医科大学学报, 2024, 42(3): 323-328.
- [24] Garner, H.W., Paturzo, M.M., Gaudier, G., Pickhardt, P.J. and Wessell, D.E. (2017) Variation in Attenuation in L1 Trabecular Bone at Different Tube Voltages: Caution Is Warranted When Screening for Osteoporosis with the Use of Opportunistic CT. *American Journal of Roentgenology*, **208**, 165-170. <https://doi.org/10.2214/ajr.16.16744>
- [25] Matheson, B.E. and Boyd, S.K. (2025) Establishing the Effect of Computed Tomography Reconstruction Kernels on the Measure of Bone Mineral Density in Opportunistic Osteoporosis Screening. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 5449. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88551-x>
- [26] Gerety, E. and Bearcroft, P.W. (2018) L1 Vertebral Density on CT Is Too Variable with Different Scanning Protocols to Be a Useful Screening Tool for Osteoporosis in Everyday Practice. *The British Journal of Radiology*, **91**, Article 20170395. <https://doi.org/10.1259/bjr.20170395>
- [27] Pompe, E., Willeminck, M.J., Dijkhuis, G.R., Verhaar, H.J.J., Hoesein, F.A.A.M. and de Jong, P.A. (2015) Intravenous Contrast Injection Significantly Affects Bone Mineral Density Measured on CT. *European Radiology*, **25**, 283-289. <https://doi.org/10.1007/s00330-014-3408-2>
- [28] Roski, F., Hammel, J., Mei, K., Haller, B., Baum, T., Kirschke, J.S., *et al.* (2021) Opportunistic Osteoporosis Screening:

- Contrast-Enhanced Dual-Layer Spectral CT Provides Accurate Measurements of Vertebral Bone Mineral Density. *European Radiology*, **31**, 3147-3155. <https://doi.org/10.1007/s00330-020-07319-1>
- [29] Tong, X., Fang, X., Wang, S., Fan, Y., Wei, W., Xiao, Q., *et al.* (2023) Virtual Unenhanced Images Derived from Dual-Energy Computed Tomography for Assessing Bone Mineral Density and Detecting Osteoporosis. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **13**, 6571-6582. <https://doi.org/10.21037/qims-23-748>
- [30] Bodden, J., Prucker, P., Sekuboyina, A., El Hussein, M., Grau, K., Rühling, S., *et al.* (2024) Reproducibility of CT-Based Opportunistic Vertebral Volumetric Bone Mineral Density Measurements from an Automated Segmentation Framework. *European Radiology Experimental*, **8**, Article No. 86. <https://doi.org/10.1186/s41747-024-00483-9>
- [31] 雍成娟, 吴波, 张晓金, 等. 定量 CT 评估身体组分研究进展[J]. 生物医学工程与临床, 2025, 29(3): 435-439.
- [32] 许乐洋, 杨丰建, 范永前. 肌少症与骨质疏松症相关性的研究进展及其中定量 CT 的应用价值[J]. 老年医学与保健, 2023, 29(2): 409-414.
- [33] 杜亚玮, 戚昕, 周阳, 等. 定量 CT 在恶性肿瘤患者体质成分中的临床应用[J]. 临床放射学杂志, 2025, 44(3): 550-553.
- [34] 汤欢, 陈明月, 李松, 等. 机会性定量 CT 分析老年人群骨肌健康特征[J]. 老年医学与保健, 2025, 31(2): 519-523.
- [35] Wang, L., Wang, W., Xu, L., Cheng, X., Ma, Y., Liu, D., *et al.* (2013) Relation of Visceral and Subcutaneous Adipose Tissue to Bone Mineral Density in Chinese Women. *International Journal of Endocrinology*, **2013**, 1-5. <https://doi.org/10.1155/2013/378632>
- [36] Wang, J., Yan, D., Hou, X., Chen, P., Sun, Q., Bao, Y., *et al.* (2017) Association of Adiposity Indices with Bone Density and Bone Turnover in the Chinese Population. *Osteoporosis International*, **28**, 2645-2652. <https://doi.org/10.1007/s00198-017-4081-5>
- [37] Campos, R.M.S., Lazaretti-Castro, M., Mello, M.T.D., Tock, L., Silva, P.L., Corgosinho, F.C., *et al.* (2012) Influence of Visceral and Subcutaneous Fat in Bone Mineral Density of Obese Adolescents. *Arquivos Brasileiros de Endocrinologia & Metabologia*, **56**, 12-18. <https://doi.org/10.1590/s0004-27302012000100003>