doi:10.11659/jjssx.08E025064

·临床研究·

腰椎MRI成像筛查骨质疏松症的临床研究

徐 凯[1],宋元礼[1],孟宁波[1],徐 岳[1],张 宁[2] (1.淄博一四八医院骨科二区,山东 淄博 255300;2.山东大学齐鲁医院骨科,山东 济南 250063)

[摘 要] **目的** 探究MRI的机会性应用在识别需进一步行骨骼健康评估的腰椎手术患者中的临床价值。**方法** 回顾性分析2020年1月至2025年1月在淄博一四八医院连续接受术前骨健康优化(BHO)评估的83例患者的临床资料,所有患者术前均行无对比剂T1加权MRI检查及双能X射线吸收测定法(DXA)检查。根据WHO骨密度T值标准及临床骨质疏松症定义,将患者分为正常骨组(21例)、骨量减少组(34例)和骨质疏松组(28例)。采用全节段椎体骨质量(VBQ)评分、单节段VBQ评分、VBQ(脂肪)评分和信噪比(SNR)对MRI图像进行评估,同时收集骨折风险评估工具(FRAX)风险因素及骨小梁评分(TBS)指标。**结果** 不同骨密度组患者的最低T值、TBS和全节段VBQ、单节段VBQ、VBQ(脂肪)评分及SNR比较,差异均具有统计学意义(P<0.05);其中全节段与单节段VBQ评分随骨密度降低呈阶梯式升高,组间两两比较差异均有统计学意义(P<0.05)。*Pearson*相关性分析显示,患者最低T值(r=−0.64,P<0.001)、TBS(r=−0.51,P<0.001)与全节段VBQ评分均呈显著负相关。受试者工作特征(*ROC*)曲线分析显示,全节段VBQ、单节段VBQ、VBQ(脂肪)评分和SNR诊断骨质疏松症的曲线下面积(*AUC*)分别为0.806(95%*CI*:0.700~0.911)、0.779(95%*CI*:0.670~0.888)、0.608(95%*CI*:0.475~0.742)和0.586(95%*CI*:0.461~0.711)。以最大约登指数确定的最佳诊断阈值为:全节段VBQ评分2.95分(敏感度91%,特异度60%),单节段VBQ评分3.06分(敏感度91%,特异度44%)。FRAX高风险患者占比25.3%(21/83),其VBQ评分显著高于低风险患者(P<0.001)。各组患者感兴趣区域(ROI)平均信号强度及标准差比较,差异有统计学意义(P<0.001)。*Pearson*相关性分析显示,ROI平均信号强度与最低T值呈负相关(r=−0.58,P<0.001)。**结论** 腰椎MRI成像可用于筛查骨质疏松症,VBQ评分≥3分可作为识别需额外行DXA检查和骨骼健康干预的实用阈值,单节段VBQ评分因简便快速更适合临床推广。

[关键词] 磁共振成像;骨质疏松症;腰椎手术;椎体骨质量;椎体骨质量评分

[中图分类号] R681.5+3;R445.2 [文献标志码] A [收稿日期] 2025-08-17

Clinical study of lumbar MRI screening for osteoporosis

XU Kai[1], SONG Yuan-li[1], MENG Ning-bo[1], XU Yue[1], ZHANG Ning[2] (1. Department of Orthopedics, the 148th Hospital, Zibo Shandong 255300, China; 2. Department of Orthopedics, Qilu Hospital, Shandong University, Jinan Shandong 250063, China)

Abstract: Objective To investigate the clinical value of opportunistic application of MRI in identifying lumbar surgery patients who need further bone health assessment. **Methods** A retrospective analysis was conducted on the clinical data of 83 patients who received preoperative bone health optimization (BHO) evaluation in the 148th Hospital from January 2020 to January 2025. All patients underwent non-contrast T1-weighted MRI and dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) before surgery. According to the WHO bone density T-score

[基金项目] 山东省自然科学基金(SK2024B042)

[通信作者] 宋元礼,E-mail:19217447855@163.com

[13] 杨 敬,苏宝金,何保华,等. 富血小板血浆对前交叉韧带重建术后膝关节功能恢复和炎症因子水平的影响[J]. 临床与病理杂志,2023,43(2):258-264. doi:10.11817/j.issn.2095-6959.2023.222018.

[14] 周国超,易守红,古浩然,等. 富血小板血浆在同种异体肌腱重建前交叉韧带中的应用[J]. 中国骨与关节杂志,2024,13(4):315-320. doi:10.3969/j.issn.2095-252X.2024.04.013.

[15] 廖 军,艾力江·阿斯拉,热依拉·吐尔逊,等. 富血小板血浆联合膝关节镜技术治疗前交叉韧带断裂的分子机制研究[J]. 骨科,2025,16(1):20-26. doi:10.3969/j.issn.1674-8573.2025.01.004.

[16] 白 晨,杨文骞,孟志超,等. 损伤前交叉韧带修复及促进移植物愈合的策略[J]. 中国组织工程研究,2024,28(9):1457-1463. doi:10.12307/2024.013.

[17] 邸冬雪,艾 奇,闫 奇,等. 补肾除湿联合富血小板血浆调控血清TGF-β1及Smad-1水平治疗膝骨关节炎[J]. 中国骨伤,2023,36(7):647-653. doi:10.12200/j.issn.1003-0034.2023.07.010.

[18] 浦飞飞,赵晓龙,杨 林,等. 自体富血小板血浆联合封闭负压引流治疗胫前慢性难愈性创面的临床疗效观察[J]. 生物骨科材料与临床研究,2024,21(2):57-60. doi:10.3969/j.issn.1672-5972.2024.02.012.

[19] 任立文,胡惠英,李 斌,等. 富血小板血浆关节腔注射对膝关节前交叉韧带损伤关节镜术后患者疼痛,膝屈曲角度及血清胰岛素样生长因子-1水平影响[J]. 临床军医杂志,2022,50(12):1294-1296. doi:10.16680/j.1671-3826.2022.12.25.

[20] 臧业峰,姜 鑫,朱卫洁,等. 富血小板血浆对前交叉韧带重建后髌股关节退变的影响[J]. 中国矫形外科杂志,2021,29(5):423-427. doi:10.3977/j.issn.1005-8478.2021.05.09.

(编辑:杨 颖)

standard and clinical definition of osteoporosis, patients were divided into the normal bone group (21 cases), osteopenia group (34 cases) and osteoporosis group (28 cases). MRI images were evaluated by whole-segment vertebral bone quality (VBQ) score, single-segment VBQ score, VBQ (fat) score and signal-to-noise ratio (SNR). Meanwhile, risk factors of fracture risk assessment tool (FRAX) and trabecular bone score (TBS) indicators were collected. **Results** There were significant differences in the lowest T value, TBS, whole-segment VBQ scores, single-segment VBQ score, VBQ (fat) score and SNR among different bone density groups (P<0.05). Among them, the VBQ scores of the whole segment and the single segment increased in a stepwise manner with the decrease of bone mineral density, and the pairwise comparisons between groups showed statistically significant differences (P<0.05). *Pearson* correlation analysis showed that the lowest T value (r=−0.64, P<0.001) and TBS (r=−0.51, P<0.001) of patients were significantly negatively correlated with the whole-segment VBQ score. *Receiver operating characteristic* (*ROC*) curve analysis showed that the *area under the curve* (*AUC*) of whole-segment VBQ score, single-segment VBQ score, VBQ (fat) score, and SNR for diagnosing osteoporosis were 0.806 (95%*CI*: 0.700 to 0.911), 0.779 (95%*CI*: 0.670 to 0.888), and 0.608 (95%*CI*: 0.475 to 0.742) and 0.586 (95%*CI*: 0.461 to 0.711), respectively. The optimal diagnostic thresholds determined by the maximum Youden index were as follows: the whole-segment VBQ score is 2.95 points (sensitivity 91%, specificity 60%), and the single-segment VBQ score is 3.06 points (sensitivity 91%, specificity 44%). The proportion of high-risk FRAX patients was 25.3% (21/83), and their VBQ score was significantly higher than that of low-risk patients (P<0.001). There were statistically significant differences in the average region of interest (ROI) signal intensity and standards deviation among the groups of patients (P<0.001). *Pearson* correlation analysis showed that the average ROI signal intensity was negatively correlated with the lowest T value (r=−0.58, P<0.001). **Conclusion** Lumbar MRI can be used to screen for osteoporosis. VBQ score of ≥3 points can serve as a practical threshold for identifying the need for additional DXA examination and bone health intervention. The single-segment VBQ score is more suitable for clinical promotion due to its simplicity and speed.

Keywords: magnetic resonance imaging; osteoporosis; thoracolumbar surgery; vertebral bone mass; vertebral bone mass score

CT是一种常见的诊断技术，可作为机会性工具用作识别骨质疏松症患者。多数脊柱手术患者在术前需进行MRI检查，以确定是否需要进一步的骨骼健康评估及潜在的术前合成代谢或抗吸收治疗[1]。腰椎MRI是临床评估骨状态的定量方法，骨质疏松症时脂肪浸润增加、骨细胞密度降低，这会导致在T1加权MRI中脂肪信号更明亮，而细胞成分信号较暗[2]。由于骨髓信号强度与骨矿物质密度呈负相关，因此高MRI信号强度可能为评估骨质疏松症提供了可能[3]。类似于机会性CT，MRI可以在椎体内创建感兴趣区域（region of interest,ROI）以测定平均信号强度，从而实现骨质疏松症的机会性筛查[4]。但不同的MRI技术可能会出现信号强度差异，从而限制其作为独立骨质疏松症潜在定量指标的应用价值[5]。标准化方法通过将信号强度标准化到图像上的另一区域，从而最小化这种变异性，因为扫描仪的依赖性效应在ROI之间应是相似的[6]。因此，本研究通过回顾性分析方法，探讨MRI结合椎体骨质量（vertebral bone quality,VBQ）评分在识别腰椎手术患者骨质疏松症风险中的潜在价值，为术前骨骼健康评估提供新的参考依据。

1 资料与方法

1.1 临床资料

回顾性分析2020年1月至2025年1月在淄博一四八医院连续接受术前骨健康优化（bone health optimization,BHO）评估的83例患者的临床资料，其中男17例，女66例；年龄50~89岁，平均（70.10±8.36）岁。有长期大剂量糖皮质激素使用史6例，髋部/脊柱骨折史11例，多次非创伤性骨折史4例；合并3期及以上慢性肾病3例，糖尿病15例，类风湿关节炎7例。57例患者完成骨小梁评分（trabecular bone score,TBS）检测，其中骨正常23例，骨异常34例。本研究已获得淄博一四八医院伦理委员会批准（批准号：ZBYSYY-2025-005），研究方案符合《赫尔辛基宣言》伦理原则。根据WHO骨密度T值标准及临床骨质疏松症定义进行分组：T值≥−1.0者纳入正常骨组；T值−2.4~−1.1者纳入骨量减少组；符合最低T值≤−2.5，或T值−2.4~−1.1且骨折风险评估工具（fracture risk assessment tool,FRAX）风险升高、有髋部或脊柱骨折史中任一项者纳入骨质疏松组。3组患者的年龄、性别、糖皮质激素使用史、骨折史、合并慢性肾病、糖尿病、类风湿关节炎比例比较，差异均无统计学意义（P>0.05），具有可比性。纳入标准：①年龄≥50岁；②具有腰椎手术指征；③术前行无对比剂T1加权MRI检查；④MRI检查前后3年内接受过双能X射线吸收测定法（dual-energy X-ray absorptiometry,DXA）检查；⑤临床资料及影像学数据完整。排除标准：①MRI提示L_1~L_4存在Modic 1型、2型变化，骨折、感染或肿瘤；②2个及以上腰椎体内有金属器械植入。

1.2 方法

1.2.1 数据收集 通过医院电子病历系统收集患者人口统计学与临床基线资料，包括性别、年龄、民

族,既往病史(长期大剂量糖皮质激素使用史、髋部/脊柱骨折史、多次非创伤性骨折史),合并症(慢性肾病、糖尿病、类风湿关节炎等),以及FRAX骨折风险评估所需的全部风险因素信息。影像学数据从医院影像归档与通信系统(picture archiving and communication systems,PACS)提取:所有患者均调取MRI检查前后3年内的DXA扫描数据,包括L_1~L_4腰椎、股骨颈、全髋的骨密度T值;其中57例患者同时具备骨小梁评分(trabecular bone score,TBS)数据。

1.2.2 MRI图像采集与评估 使用1.5T扫描仪采集患者的腰椎T1加权平扫MRI图像,自旋回波序列采集参数:TR 400~850 ms,TE 8~20 ms,层厚4 mm。由2名经过统一培训的影像学医师独立阅片,在同一工作站通过PACS进行评估:①先通过腰椎矢状位确定正中矢状面,若存在脊柱侧凸则采用旁矢状面;②在L_1~L_4椎体中心区域放置椭圆形ROI,避免覆盖骨皮质、终板及椎间盘;同时在L_2和L_3水平脑脊液区、L_5和S_1背侧脂肪区及L_4皮肤区放置参考ROI;③分别测量L_1~L_4各椎体ROI的平均信号强度,取其平均值作为全节段椎体平均信号强度;单节段VBQ评分采用单个椎体信号强度计算。随机选取30例患者的MRI进行阅片者间可靠性检验,采用组内相关系数(intraclass correlation coefficient,ICC)评估一致性。

1.3 观察指标

记录影像学指标[7-8]:①全节段VBQ评分,即L_1~L_4椎体平均信号强度与脑脊液信号强度的比值;②单节段VBQ评分,即单个椎体信号强度与脑脊液信号强度的比值;③VBQ(脂肪)评分,即椎体平均信号强度与脂肪组织信号强度的比值,结果×10化为整数;④信噪比(signal-to-noise ratio,SNR),即椎体平均信号强度与噪声标准差的比值。统计ROI相关参数(平均信号强度、面积、标准差)。

记录骨密度与骨质量相关指标:最低T值(金标准分组依据)、TBS。其中TBS用于反映骨小梁微结构完整性,设置目的为验证VBQ评分不仅与骨矿物质密度相关,还可间接反映骨微结构退变状态,从多维度验证VBQ的骨质量评估价值。TBS≥1.31为骨正常,TBS<1.31为骨异常。

记录骨折风险指标:FRAX预测未来10年主要骨质疏松性骨折风险、髋部骨折风险,定义主要骨质疏松性骨折风险≥20%或髋部骨折风险≥3%为高风险。

1.4 统计学方法

使用SPSS 27.0软件进行统计学分析。计量资料以均数±标准差($\bar{x}\pm s$)表示,经*Shapiro-Wilk*检验符合正态分布,组间比较采用单因素方差分析(*ANOVA*),两两比较采用*LSD-t*检验;计数资料以率(%)表示,组间比较采用χ^2检验。阅片者间和阅片者内的一致性采用二类和三类ICC评估;相关性分析采用*Pearson*相关系数;采用受试者工作特征(*receiver operating characteristic*,*ROC*)曲线确定各评分的诊断效能,以最大约登指数确定最佳诊断阈值。$P<0.05$为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 患者最低T值、TBS和影像学指标比较

TBS检测结果显示,正常骨组患者均骨正常,骨量减少组患者骨正常8例、骨异常26例,骨质疏松组患者均为骨异常。各组患者的最低T值、TBS和全节段VBQ、单节段VBQ、VBQ(脂肪)评分及SNR比较,差异均有统计学意义($P<0.001$);其中全节段与单节段VBQ评分随骨密度降低呈阶梯式升高,组间两两比较差异均有统计学意义($P<0.05$),见表1。*Pearson*相关性分析显示,患者最低T值($r=-0.64$,$P<0.001$)、TBS($r=-0.51$,$P<0.001$)与全节段VBQ评分均呈显著负相关。

表1 各组患者间最低T值、TBS和影像学指标比较($\bar{x}\pm s$)

组别	n	最低T值	TBS	全节段VBQ评分(分)	单节段VBQ评分(分)	VBQ(脂肪)评分(分)	SNR
正常骨组	21	−0.32±0.28	1.38±0.06	2.13±0.07	2.21±0.09	12.35±0.82	18.62±2.15
骨量减少组	34	−1.76±0.31*	1.29±0.05*	2.65±0.08*	2.74±0.10*	13.72±0.95*	20.14±2.38*
骨质疏松组	28	−2.98±0.45*#	1.21±0.04*#	3.12±0.11*#	3.25±0.13*#	14.58±1.06*#	21.37±2.56*#
F		454.034	72.352	18.759	16.228	7.851	5.423
P		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.006

*:与正常骨组比较,$P<0.05$;#:与骨量减少组比较,$P<0.05$

2.2 腰椎MRI诊断骨质疏松症的效能

进一步对上述四项影像学指标进行*ROC*曲线分析,全节段VBQ、单节段VBQ、VBQ(脂肪)评分及SNR诊断骨质疏松症的曲线下面积(*area under the curve*,*AUC*)分别为0.806(95%*CI*:0.700~0.911)、0.779(95%*CI*:0.670~0.888)、0.608(95%*CI*:0.475~0.742)和0.586(95%*CI*:0.461~0.711),见图1。以最大约登指数确定的最佳诊断阈值为:全节段VBQ评分2.95分(敏感度91%,特异度60%),单节段VBQ评分3.06分(敏感度91%,特异度44%)。

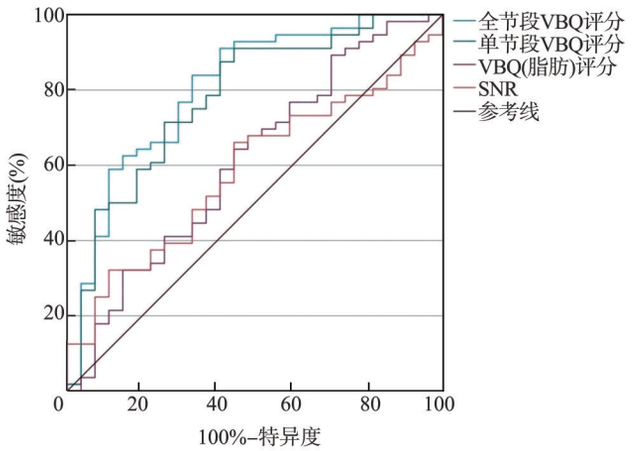


图1 *ROC*曲线分析腰椎MRI参数对骨质疏松症的诊断价值

2.3 FRAX风险因素与骨质疏松症及VBQ评分的关联

83例患者中,FRAX高风险患者21例(25.30%),低风险患者62例(74.70%),其中10例(16.13%)被诊断为骨质疏松症。FRAX高风险患者骨质疏松症发生率高于低风险患者,VBQ评分高于低风险患者,差异均具有统计学意义(P<0.001),见表2。*Pearson*相关性分析显示,FRAX主要骨质疏松性骨折风险(r=0.43,P<0.001)、髋部骨折风险(r=0.38,P<0.001)与VBQ评分均呈正相关。

表2 FRAX风险与骨质疏松症及VBQ评分的相关性

患者类别	n	骨质疏松症[例(%)]	VBQ评分(分)
FRAX高风险	21	19(90.48)	3.87±0.62
FRAX低风险	62	10(16.13)	2.76±0.58
χ^2		42.369	8.212
P		<0.001	<0.001

2.4 ROI相关参数的组间比较

各组患者ROI面积比较,差异无统计学意义(P=0.286);各组患者ROI平均信号强度及标准差比较,差异有统计学意义(P<0.001),见表3。*Pearson*相关性分析显示,ROI平均信号强度与最低T值呈负相关(r=-0.58,P<0.001)。

表3 各组患者ROI相关参数比较($x\pm s$)

组别	n	ROI平均信号强度($\times10^3$)	ROI面积(mm^2)	ROI标准差($\times10^3$)
正常骨组	21	2.36±0.32	38.6±4.2	0.31±0.08
骨量减少组	34	2.89±0.41	39.1±3.8	0.45±0.11
骨质疏松组	28	3.57±0.53	37.8±4.5	0.62±0.15
F		42.678	1.273	36.920
P		<0.001	0.286	<0.001

3 讨论

本研究首次在腰椎手术患者群体中验证了MRI机会性应用结合VBQ评分筛查骨质疏松症的有效性,结果显示,全节段VBQ评分对骨质疏松症的诊断*AUC*达0.806,最佳阈值为2.95分(敏感度91%,特异度60%),与相关研究结果(*AUC*=0.810)高度一致[9],证实了VBQ评分在骨质疏松症筛查中的稳定性和普适性。本研究中单节段VBQ评分对骨质疏松症的诊断效能(*AUC*=0.779)接近全节段VBQ评分,且测量耗时不足2 min。也有研究认为VBQ评分≥3分可作为骨质疏松症的实用筛查阈值[10]。本研究中3组患者的ROI面积无统计学差异,提示本研究中ROI放置的大小与位置一致性较好,排除了ROI面积差异对椎体信号强度测量的干扰,保证了VBQ评分测量的可靠性。ROI平均信号强度随骨密度降低而逐渐升高,这与骨质疏松的病理改变完全契合:骨量丢失伴随骨髓脂肪浸润增加,脂肪组织在T1加权像上呈高信号,直接导致椎体整体信号强度上升[9]。此外,ROI信号标准差随骨密度降低而显著增大,提示骨质疏松状态下,骨髓内脂肪与残存骨小梁的分布更不均一,组织成分异质性增加,这也是骨微结构退变在影像学上的间接体现。上述结果从信号特征层面进一步验证了VBQ评分评估骨质量的病理生理基础[10]。

本研究发现VBQ(脂肪)评分和SNR对骨质疏松症的诊断效能较差(*AUC*分别仅为0.608、0.586),这与既往部分研究存在差异[7-8]。分析其原因:①SNR测量受图像伪影干扰较大[11],导致SNR变异度高;②VBQ评分通过脑脊液进行个体内标准化,脑脊液成分的个体间一致性好,有效降低了扫描仪差异,减少了伪影的影响[12];③VBQ(脂肪)评分依赖脂肪组织ROI的精准放置,而腰椎背侧脂肪分布个体差异较大,可能导致标准化效果不佳[13]。这提示基于脑脊液的标准化方案更适合腰椎MRI的机会性筛查[14]。从机制层面看,骨质疏松症的核心病理改变是骨小梁丢失和骨髓脂肪浸润,骨髓脂肪含量增加会缩短T1弛豫时间,使T1加权MRI上椎体信号强度升高。VBQ评分通过椎体与脑脊液的信号比值量化这一改变,间接反映骨量状态[15]。本研究中全节段VBQ评分与最低T值、TBS的负相关关系也印证了这一病理生理关联。此外,本研究发现FRAX高风险患者的VBQ评分显著高于低风险患者,且FRAX高风险患者骨质疏松症发生率高于低风险患者,提示VBQ评分可同时整合骨密度和骨折风险因素,为术前骨质疏松症的综合评估提供更全面的参考[16-17]。本研究同时纳入T值与TBS两项骨质量相关指标,其中T值为骨质疏松症诊断的金标准,用于分组与诊断效能对照;TBS则反映骨小梁微结构状态,可补充骨密度之外的骨质量信息[18]。此外,骨量减少组中存在8例TBS正常的患者,说明骨量减少阶段骨密度下降与骨微结构损伤并非完全同步,部分患者骨微结构尚未出现显著退变;这也解释了为何部分骨量

减少患者骨折风险较低——骨微结构的保留可在一定程度上维持骨强度[19]。VBQ评分作为基于骨髓信号的综合指标,可同时捕捉密度与微结构的改变,比单一骨密度指标更具临床参考价值。

本研究存在的局限性[18-19]:①为单中心回顾性研究,样本量较小,且女性占比偏高(79.5%),可能存在选择偏倚;②ROI放置为人工操作,虽经阅片者一致性检验,仍可能存在主观误差;③未纳入年轻患者,VBQ评分的年龄适应性需进一步探索。因此,未来需开展多中心、大样本的前瞻性研究,并结合深度学习技术开发自动化ROI分割算法,提升测量的客观性和效率,进一步验证本研究结果。

综上,MRI的机会性应用结合VBQ评分是腰椎手术患者术前骨质疏松症筛查的有效工具,VBQ评分≥3分可作为识别需额外行DXA检查和骨健康干预的实用阈值。单节段VBQ评分因简便快速的优势,临床推广应用价值更高,未来可进一步优化测量方案,将其作为脊柱手术前常规评估的补充项目。

[参考文献]

[1] Lin X, Shen R, Zheng X, et al. Utilizing radiomics techniques to isolate a single vertebral body from chest CT for opportunistic osteoporosis screening[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2024, 25(1): 785. doi:10.1186/s12891-024-07903-2.

[2] Park H, Han S, Hwang Y, et al. Skeletal muscle measurements based on abdominal computerized tomography (CT) predict risk of osteoporosis in incident hemodialysis patients[J]. J Clin Med, 2024, 13(24): 7696. doi:10.3390/jcm13247696.

[3] 胡运祥,朱艳敏,谢小清,等. 中老年男性骨质疏松症的MRI影像组学模型构建与应用研究[J]. 影像技术, 2025, 37(1): 8-13. doi: 10.3969/j.issn.1001-0270.2025.01.02.

[4] 蒋树兵,陈伯雄,胡根文. 氢质子MR波谱及双回波同反相位成像评价腰椎骨质疏松的研究[J]. 影像科学与光化学, 2021, 39(2): 202-206. doi:10.7517/issn.1674-0475.200723.

[5] Liu J, Wang H, Shan X, et al. Hybrid transformer convolutional neural network-based radiomics models for osteoporosis screening in routine CT[J]. BMC Med Imaging, 2024, 24(1): 62. doi: 10.1186/s12880-024-01240-5.

[6] Chen S, Guo L, Zhao H, et al. Quantitative measurements of dual-energy CT parameters in the diagnosis of osteoporosis - a highly sensitive and specific technique: an observational study[J]. Medicine (Baltimore), 2024, 103(27): e38559. doi: 10.1097/MD.0000000000038559.

[7] Park PSU, Werner TJ, Alavi A. PET/CT for the opportunistic screening of osteoporosis and fractures in cancer patients[J]. Curr Osteoporos Rep, 2024, 22(6): 553-560. doi: 10.1007/s11914-024-00887-x.

[8] Pan J, Lin P, Gong S, et al. Effectiveness of opportunistic osteoporosis screening on chest CT using the DCNN model[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2024, 25(1): 176. doi: 10.1186/s12891-024-07297-1.

[9] Park MS, Ha HI, Lim HK, et al. Femoral osteoporosis prediction model using autosegmentation and machine learning analysis with PyRadiomics on abdomen-pelvic computed tomography (CT)[J]. Quant Imaging Med Surg, 2024, 14(6): 3959-3969. doi: 10.21037/qims-23-1751.

[10] Kucukciloglu Y, Sekeroglu B, Adali T, et al. Prediction of osteoporosis using MRI and CT scans with unimodal and multimodal deep-learning models[J]. Diagn Interv Radiol, 2024, 30(1): 9-20. doi: 10.4274/dir.2023.232116.

[11] Fang K, Zheng X, Lin X, et al. A comprehensive approach for osteoporosis detection through chest CT analysis and bone turnover markers: harnessing radiomics and deep learning techniques[J]. Front Endocrinol (Lausanne), 2024, 15: 1296047. doi: 10.3389/fendo.2024.1296047.

[12] Reginster J, Czerwinski E, Wilk K, et al. Efficacy and safety of candidate biosimilar CT-P41 versus reference denosumab: a double-blind, randomized, active-controlled, phase 3 trial in postmenopausal women with osteoporosis[J]. Osteoporos Int, 2024, 35(11): 1919-1930. doi: 10.1007/s00198-024-07161-x.

[13] Wang J, He Y, Yan L, et al. Predicting osteoporosis and osteopenia by fusing deep transfer learning features and classical radiomics features based on single-source dual-energy CT imaging[J]. Acad Radiol, 2024, 31(10): 4159-4170. doi: 10.1016/j.acra.2024.04.022.

[14] Pan J, Lin P, Gong S, et al. Feasibility study of opportunistic osteoporosis screening on chest CT using a multi-feature fusion DCNN model[J]. Arch Osteoporos, 2024, 19(1): 98. doi: 10.1007/s11657-024-01455-7.

[15] Xue C, Lu X, Sun G, et al. Efficacy of opportunistic screening with chest CT in identifying osteoporosis and osteopenia in patients with T2DM[J]. Diabetes Metab Syndr Obes, 2024, 17: 2155-2163. doi: 10.2147/DMSO.S462065.

[16] Tong X, Wang S, Zhang J, et al. Automatic osteoporosis screening system using radiomics and deep learning from low-dose chest CT images[J]. Bioengineering (Basel), 2024, 11(1): 50. doi: 10.3390/bioengineering11010050.

[17] Hu J, Jin Y, Wu J, et al. Skeletal muscle index based on CT at the 12th thoracic spine level can predict osteoporosis and fracture risk: a propensity score-matched cohort study[J]. Front Med (Lausanne), 2024, 11: 1387807. doi: 10.3389/fmed.2024.1387807.

[18] Chaisen M, Sritara C, Chitrapazt N, et al. Opportunistic screening for osteoporosis by CT as compared with DXA[J]. Diagnostics (Basel), 2024, 14(24): 2846. doi: 10.3390/diagnostics14242846.

[19] 习 楠,廖 丹,李 鑫,等. 定量CT在骨质疏松症临床诊断与治疗中的应用研究进展[J]. 中国医学科学院学报, 2024, 47(1): 118-125. doi: 10.3881/j.issn.1000-503X.16035.

(编辑:杨 颖)