

基于常规胸腹部CT的L1椎体骨衰减 - 椎旁肌肉退变耦合指标辅助识别老年骨质疏松性椎体压缩骨折的价值

吴杰¹, 李果², 侯键^{3*}

¹成都中医药大学医学与生命科学学院, 四川 成都

²中国人民解放军西部战区总医院放射诊断科, 四川 成都

³成都中医药大学附属医院放射科, 四川 成都

收稿日期: 2026年8月2日; 录用日期: 2026年8月26日; 发布日期: 2026年9月4日

摘要

目的: 探讨常规胸腹部计算机体层成像(computed tomography, CT)中L1椎体松质骨CT值及椎旁肌肉参数对老年骨质疏松性椎体压缩骨折(osteoporotic vertebral compression fracture, OVCF)的辅助识别价值, 并评价联合模型的增量效能。方法: 回顾性纳入2023年1月至2025年12月于西部战区总医院接受胸部或腹部平扫CT且扫描范围包含L1椎体的老年患者196例, 其中OVCF组72例、非OVCF组124例。测量L1椎体CT值、椎旁肌肉总横截面积、身高校正肌肉指数、椎旁肌肉密度及肌肉脂肪浸润指数, 构建骨-肌耦合评分。采用多因素Logistic回归、受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线、校准曲线、决策曲线及重分类分析评价模型效能。结果: OVCF组L1椎体CT值、椎旁肌肉总横截面积、身高校正肌肉指数及椎旁肌肉密度低于非OVCF组, 肌肉脂肪浸润指数高于非OVCF组(均 $P < 0.01$)。多因素Logistic回归分析结果显示, 年龄 ≥ 75 岁、既往脆性骨折史、L1椎体CT值、椎旁肌肉总横截面积及椎旁肌肉密度是OVCF的影响因素(均 $P < 0.05$)。联合模型ROC曲线下面积为0.805 (95% CI: 0.741~0.869), 高于临床变量 + L1椎体CT值模型(DeLong检验 $P = 0.026$); Hosmer-Lemeshow检验 $P = 0.312$, Bootstrap校正后校准斜率为0.94。阈值概率为15%~65%时, 联合模型具有较高净获益; 连续净重分类改善指数为0.284, 综合判别改善指数为0.061。结论: 基于常规胸腹部CT的L1椎体骨衰减与椎旁肌肉退变联合评估可辅助识别老年OVCF, 并为进一步骨密度及骨代谢评估提供影像学提示, 但仍需多中心、前瞻性研究验证。

关键词

骨质疏松, 椎体压缩骨折, 计算机体层成像, L1椎体CT值, 椎旁肌肉, 肌肉脂肪浸润, 机会性筛查

*通讯作者。

Value of an L1 Vertebral Bone Attenuation-Paraspinal Muscle Degeneration Coupling Index Derived from Routine Chest and Abdominal CT for Aiding Identification of Osteoporotic Vertebral Compression Fractures in Older Adults

Jie Wu¹, Guo Li², Jian Hou^{3*}

¹School of Medical and Life Sciences, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu Sichuan

²Department of Radiological Diagnosis, General Hospital of Western Theater Command of PLA, Chengdu Sichuan

³Department of Radiology, The Affiliated Hospital of Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu Sichuan

Received: August 2, 2026; accepted: August 26, 2026; published: September 4, 2026

Abstract

Objective: To investigate the value of L1 vertebral cancellous bone CT attenuation and paraspinal muscle parameters measured on routine chest and abdominal computed tomography (CT) for aiding identification of osteoporotic vertebral compression fracture (OVCF) in older adults, and to evaluate the incremental performance of a combined model. **Methods:** This retrospective study included 196 older patients who underwent non-contrast chest or abdominal CT at the General Hospital of Western Theater Command from January 2023 to December 2025, with the scan range including the L1 vertebra. There were 72 patients in the OVCF group and 124 in the non-OVCF group. L1 vertebral CT attenuation, total cross-sectional area of the paraspinal muscles, height-adjusted muscle index, paraspinal muscle density, and muscle fat infiltration index were measured, and a bone-muscle coupling score was constructed. Multivariable logistic regression, receiver operating characteristic (ROC) curves, calibration curves, decision curve analysis, and reclassification analyses were used to evaluate model performance. **Results:** The OVCF group had lower L1 vertebral CT attenuation, total paraspinal muscle cross-sectional area, height-adjusted muscle index, and paraspinal muscle density, and a higher muscle fat infiltration index than the non-OVCF group (all $P < 0.01$). Multivariable logistic regression showed that age ≥ 75 years, history of fragility fracture, L1 vertebral CT attenuation, total paraspinal muscle cross-sectional area, and paraspinal muscle density were associated with OVCF (all $P < 0.05$). The area under the ROC curve of the combined model was 0.805 (95% CI: 0.741~0.869), which was higher than that of the model including clinical variables plus L1 vertebral CT attenuation (DeLong test, $P = 0.026$); the Hosmer-Lemeshow test yielded $P = 0.312$, and the bootstrap-corrected calibration slope was 0.94. At threshold probabilities of 15%~65%, the combined model showed higher net benefit; the continuous net reclassification improvement was 0.284 and the integrated discrimination improvement was 0.061. **Conclusion:** Combined assessment of L1 vertebral bone attenuation and paraspinal muscle degeneration on routine chest and abdominal CT can aid in identifying OVCF in older adults and provide imaging clues for further bone mineral density and bone metabolism evaluation; however, multicenter prospective validation is still required.

Keywords

Osteoporosis, Vertebral Compression Fracture, Computed Tomography, L1 Vertebral CT Attenuation, Paraspinal Muscle, Muscle Fat Infiltration, Opportunistic Screening

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

骨质疏松性椎体压缩骨折(osteoporotic vertebral compression fracture, OVCF)是老年骨质疏松症常见且容易被低估的后果之一[1]。椎体压缩改变可造成持续腰背痛、身高降低、脊柱后凸、活动能力下降以及后续脆性骨折风险增加。相当部分患者临床表现不典型,常在因呼吸系统、消化系统或肿瘤随访接受胸腹部CT检查时被影像发现。近年来系统综述提示,常规CT图像中的骨密度相关影像生物标志物可用于骨质疏松性骨折的机会性筛查[2]。

双能X线吸收法(dual-energy X-ray absorptiometry, DXA)仍是骨密度评估的重要方法,但在真实临床场景中存在覆盖不足、预约不便、难以直接判断椎体形态及易受退变影响等局限[3]。与DXA对照研究显示,非增强腹部CT椎体亨氏单位(Hounsfield unit, HU)测量可为低骨量筛查提供补充信息[4]。胸部CT研究亦提示,椎体HU值结合胸部肌肉指标可提高机会性筛查的可获得性[5]。L1椎体覆盖率较高、定位清晰且测量流程简便,适合作为常规胸腹部CT的代表层面[6];基于腹盆部CT的机器学习研究也支持从既有CT中提取多部位骨衰减信息用于低骨量筛查[7]。

然而,OVCF并非单纯由骨量下降决定。Hounsfield单位对胸腰段骨质疏松相关骨折具有一定诊断提示价值[8]。CT值差异还可用于新鲜与陈旧OVCF的定量识别探索[9]。椎旁肌肉直接参与脊柱稳定、姿势控制和轴向负荷分担,骨质量与椎旁肌肉质量的共同下降已被报道与脆性OVCF相关[10]。双能量相关肌肉成分参数研究进一步提示,椎旁肌肉质量可参与急性椎体骨折风险评估[11]。因此,仅依赖椎体CT值进行识别容易忽视一部分骨量处于临界范围但肌肉退变较重的患者。

基于上述认识,本研究将L1椎体CT值与同层面椎旁肌肉量和肌肉质量指标纳入同一评估框架,重点分析其与OVCF的关系及联合模型的增量价值,并在ROC曲线下面积之外补充校准、决策曲线和重分类分析。既往研究显示,椎旁肌参数可用于椎体增强术后新发压缩骨折风险分层[12],临床和椎旁肌肉特征可为后续骨折模型提供独立信息[13],脊柱肌骨参数整合亦有助于老年OVCF辅助识别[14]。

2. 资料与方法

2.1. 一般资料

回顾性纳入2023年1月至2025年12月于中国人民解放军西部战区总医院接受胸部或腹部平扫CT检查的老年患者。纳入标准:①年龄 ≥ 60 岁;②扫描范围包含L1椎体,并具备薄层横断面及多平面重建图像;③图像质量满足椎体和椎旁肌肉定量测量;④临床资料相对完整。

排除标准:①明确高能量外伤所致椎体骨折;②椎体肿瘤、骨转移瘤、感染性病变、血液系统疾病或其他代谢性骨病累及脊柱;③L1椎体存在明显局灶性硬化、骨岛或手术改变,影响松质骨CT值测量;④既往椎体成形术、脊柱内固定或金属伪影影响测量;⑤仅有增强扫描且无法获得平扫序列;⑥关键资料缺失。

依据 OVCF 判定标准将患者分为 OVCF 组 72 例和非 OVCF 组 124 例。OVCF 组为 CT 显示椎体压缩形态并符合骨质疏松性骨折判定者, 非 OVCF 组为未见椎体压缩形态改变者。

2.2. 方法

2.2.1. 临床资料收集

由 2 名研究人员通过医院电子病历、影像存储与传输系统(picture archiving and communication system, PACS)及检验系统收集资料, 并交叉核对。收集指标依次为年龄、年龄分层、性别、体质量指数(body mass index, BMI)、吸烟史、饮酒史、高血压、糖尿病、慢性肾脏病、慢性阻塞性肺疾病、长期糖皮质激素使用史、既往脆性骨折史、近期低能量损伤史、腰背痛主诉、既往抗骨质疏松治疗史、血钙、碱性磷酸酶、25-羟维生素 D [25(OH)D]、白蛋白、估算肾小球滤过率(estimated glomerular filtration rate, eGFR)及 CT 检查类型。实验室指标采用距 CT 检查时间最近的检测结果。

2.2.2. CT 检查与图像处理

所有患者均采用多排螺旋 CT 完成检查。主要扫描参数为管电压 120 kVp、自动管电流调节、矩阵 512×512 、层厚 1.0~1.25 mm, 并采用标准软组织算法及骨算法重建。为减少对比剂对椎体及肌肉 CT 值的影响, 仅采用平扫图像进行定量分析。图像传入 PACS 后, 以统一窗宽、窗位进行定位, 并结合骨窗确认椎体边界及压缩形态。

2.2.3. OVCF 判定与分组

OVCF 判定由 2 名高年资放射科医师基于 CT 矢状位、冠状位及横断面重建图像独立完成, 并结合低能量损伤史、疼痛部位、既往影像及临床诊断记录综合判断。椎体前缘、中部或后缘高度较相邻椎体下降 $> 20\%$, 且伴楔形、双凹形或压缩形态改变者判定为 OVCF; 存在肿瘤性骨破坏、感染性破坏或高能量创伤特征者不纳入 OVCF 组。2 名医师意见不一致时经协商达成一致。

2.2.4. CT 定量测量

2 名放射科医师在未知分组信息的情况下独立完成测量。L1 椎体 CT 值选取椎体中部横断面, 在松质骨中心放置面积约 $150 \sim 250 \text{ mm}^2$ 的圆形或椭圆形感兴趣区, 避开骨皮质、椎静脉沟、局灶性硬化、骨岛及终板退变区域, 连续测量 3 次并取平均值。

椎旁肌肉参数在 L1 同层面获得。沿双侧竖脊肌、多裂肌及可见腰大肌外缘勾画感兴趣区, 避开椎体、肋骨、皮下脂肪及腹腔脏器, 计算椎旁肌肉总横截面积; 以总横截面积除以身高平方得到身高校正肌肉指数; 以肌肉区域平均 CT 值表示椎旁肌肉密度; 肌肉脂肪浸润指数定义为肌肉感兴趣区内脂肪衰减范围像素($-190 \sim -30 \text{ HU}$)占全部肌肉像素的比例。骨-肌耦合评分 = $Z(\text{L1 椎体 CT 值}) + Z(\text{椎旁肌肉密度}) + Z(\text{身高校正肌肉指数}) - Z(\text{肌肉脂肪浸润指数})$, 各 Z 值基于总样本均数和标准差计算, 评分越低表示骨衰减与肌肉退变越重; 该评分作为探索性复合指标, 用于表征骨与肌肉联合退变趋势, 不作为主模型核心变量, 其等权构建尚需进一步验证。随机抽取 40 例进行重复测量, 评价观察者内及观察者间一致性。

2.3. 观察指标

观察指标包括: ① 两组一般资料; ② 两组 L1 椎体 CT 值、椎旁肌肉总横截面积、身高校正肌肉指数、椎旁肌肉密度、肌肉脂肪浸润指数及骨-肌耦合评分; ③ CT 定量参数观察者内及观察者间组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC); ④ OVCF 影响因素; ⑤ 单一指标及联合模型的 ROC 曲线下面积、最佳截断值、敏感度、特异度、校准度、临床净获益及重分类改善指标。

2.4. 统计学方法

采用 SPSS 26.0 和 R 4.3 软件进行统计分析。正态分布的计量资料以均数 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm s$)表示, 两组间比较采用独立样本 t 检验; 非正态分布的计量资料以中位数和四分位数[M (P25, P75)]表示, 组间比较采用 Mann-Whitney U 检验。计数资料以例数和百分比[n (%)]表示, 组间比较采用 χ^2 检验或 Fisher 确切概率法。以 OVCF 状态为因变量(非 OVCF=0, OVCF=1), 将年龄 ≥ 75 岁、BMI、既往脆性骨折史、长期糖皮质激素使用史、L1 椎体 CT 值、椎旁肌肉总横截面积及椎旁肌肉密度纳入多因素 Logistic 回归分析。年龄连续值及年龄分层与年龄 ≥ 75 岁存在共线性; 近期低能量损伤史和腰背痛主诉参与 OVCF 判定, 可能造成循环解释; 身高校正肌肉指数、肌肉脂肪浸润指数及骨-肌耦合评分与已纳入影像指标存在共线性; 25(OH)D、白蛋白、eGFR 等虽存在组间差异, 但考虑事件数、资料完整性、潜在反向因果及模型复杂度, 未纳入主模型, 结果解释时需考虑残余混杂。采用 ROC 曲线及 DeLong 检验评价区分度, 采用 Hosmer-Lemeshow 检验、校准曲线和 1000 次 Bootstrap 重抽样评价校准度, 采用决策曲线分析评价临床净获益, 采用连续净重分类改善指数和综合判别改善指数评价椎旁肌肉参数的增量价值。双侧 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

3. 结果

3.1. 两组基线资料比较

共纳入 196 例患者, 其中 OVCF 组 72 例、非 OVCF 组 124 例。OVCF 组年龄、慢性阻塞性肺疾病、既往脆性骨折史、近期低能量损伤史、腰背痛主诉及既往抗骨质疏松治疗史的比例高于非 OVCF 组, BMI、血钙、25(OH)D、白蛋白及 eGFR 低于非 OVCF 组, 碱性磷酸酶高于非 OVCF 组, 差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$); 其余一般资料组间差异无统计学意义(均 $P > 0.05$)。见表 1。

Table 1. Comparison of baseline characteristics between the two groups
表 1. 两组患者基线资料比较

项目	OVCF 组(n = 72)	非 OVCF 组(n = 124)	检验值	P 值
年龄(岁)	76.10 $\pm$ 6.40	71.70 $\pm$ 5.60	$t = 5.029$	<0.001
年龄分层				
60~69 岁	12 (16.67)	42 (33.87)		
70~79 岁	40 (55.56)	69 (55.65)	$\chi^2 = 12.985$	0.002
≥ 80 岁	20 (27.78)	13 (10.48)		
女性	44 (61.11)	68 (54.84)	$\chi^2 = 0.732$	0.392
BMI (kg/m ²)	22.60 $\pm$ 2.90	24.10 $\pm$ 2.80	$t = -3.568$	<0.001
吸烟史	16 (22.22)	25 (20.16)	$\chi^2 = 0.117$	0.732
饮酒史	7 (9.72)	21 (16.94)	$\chi^2 = 1.936$	0.164
高血压	42 (58.33)	63 (50.81)	$\chi^2 = 1.038$	0.308
糖尿病	15 (20.83)	23 (18.55)	$\chi^2 = 0.152$	0.696
慢性肾脏病	11 (15.28)	10 (8.06)	$\chi^2 = 2.478$	0.115
慢性阻塞性肺疾病	10 (13.89)	6 (4.84)	$\chi^2 = 4.977$	0.026
长期糖皮质激素使用史	9 (12.50)	9 (7.26)	$\chi^2 = 1.501$	0.221

续表

既往脆性骨折史	18 (25.00)	15 (12.10)	$\chi^2 = 5.416$	0.020
近期低能量损伤史	31 (43.06)	18 (14.52)	$\chi^2 = 19.787$	<0.001
腰背痛主诉	45 (62.50)	34 (27.42)	$\chi^2 = 23.299$	<0.001
既往抗骨质疏松治疗史	13 (18.06)	9 (7.26)	$\chi^2 = 5.329$	0.021
血钙(mmol/L)	2.20 ± 0.13	2.26 ± 0.12	t = -3.272	0.001
碱性磷酸酶(U/L)	96.50 ± 28.10	82.70 ± 20.40	t = 3.961	<0.001
25(OH)D (ng/mL)	17.90 ± 6.10	21.50 ± 6.40	t = -3.862	<0.001
白蛋白(g/L)	37.80 ± 4.10	40.10 ± 3.30	t = -4.296	<0.001
eGFR (mL/min/1.73 m ²)	81.20 ± 15.90	85.70 ± 14.80	t = -1.997	0.047
CT 检查类型				
胸部	34 (47.22)	70 (56.45)	$\chi^2 = 1.558$	0.212
腹部	38 (52.78)	54 (43.55)		

注：计量资料以均数 ± 标准差表示；计数资料以例数(%)表示。BMI 为体质质量指数，25(OH)D 为 25-羟维生素 D，eGFR 为估算肾小球滤过率。

3.2. CT 定量参数比较

OVCF 组 L1 椎体 CT 值、椎旁肌肉总横截面积、身高校正肌肉指数及椎旁肌肉密度低于非 OVCF 组，肌肉脂肪浸润指数高于非 OVCF 组，骨 - 肌耦合评分低于非 OVCF 组，差异均有统计学意义(均 $P \leq 0.001$)。见表 2。

Table 2. Comparison of CT quantitative parameters between the two groups

表 2. 两组 CT 定量参数比较

参数	OVCF 组(n = 72)	非 OVCF 组(n = 124)	检验值	P 值
L1 椎体 CT 值(HU)	94.80 ± 30.20	116.20 ± 31.40	t = -4.664	<0.001
椎旁肌肉总横截面积(cm ²)	35.10 ± 6.60	38.40 ± 6.90	t = -3.279	<0.001
身高校正肌肉指数(cm ² /m ²)	13.50 ± 2.20	14.60 ± 2.30	t = -3.279	<0.001
椎旁肌肉密度(HU)	29.40 ± 8.70	35.80 ± 9.10	t = -4.823	<0.001
肌肉脂肪浸润指数(%)	24.60 ± 7.40	19.80 ± 6.50	t = 4.734	<0.001
骨 - 肌耦合评分	-1.28 ± 1.12	0.74 ± 1.15	t = -11.968	<0.001

注：椎旁肌肉总横截面积为双侧竖脊肌、多裂肌及可见腰大肌横截面积之和；骨 - 肌耦合评分越低提示骨衰减与肌肉退变越重。

3.3. 测量一致性分析

随机抽取 40 例进行重复测量，各项指标观察者内 ICC 为 0.905~0.951，观察者间 ICC 为 0.891~0.938，表明测量一致性良好。见表 3。

3.4. OVCF 影响因素的多因素 Logistic 回归分析

变量赋值如下：OVCF 状态(非 OVCF = 0，OVCF = 1)；年龄 ≥ 75 岁(否 = 0，是 = 1)；BMI 按每增

加 1 kg/m² 赋值；既往脆性骨折史(无 = 0，有 = 1)；长期糖皮质激素使用史(无 = 0，有 = 1)；L1 椎体 CT 值按每增加 10 HU 赋值；椎旁肌肉总横截面积按每增加 5 cm² 赋值；椎旁肌肉密度按每增加 5 HU 赋值。

Table 3. Measurement consistency analysis of CT quantitative parameters
表 3. CT 定量参数测量一致性分析

参数	观察者内 ICC	观察者间 ICC	观察者间 ICC 95% CI
L1 椎体 CT 值	0.951	0.938	0.907~0.969
椎旁肌肉总横截面积	0.934	0.920	0.886~0.955
身高校正肌肉指数	0.928	0.914	0.876~0.950
椎旁肌肉密度	0.916	0.902	0.860~0.944
肌肉脂肪浸润指数	0.905	0.891	0.844~0.936
骨 - 肌耦合评分	0.942	0.927	0.892~0.961

注：ICC 为组内相关系数。

Logistic 回归分析结果显示，年龄 ≥ 75 岁、既往脆性骨折史、L1 椎体 CT 值、椎旁肌肉总横截面积及椎旁肌肉密度是 OVCF 的影响因素(均 $P < 0.05$)；BMI 及长期糖皮质激素使用史与 OVCF 的关联无统计学意义(均 $P > 0.05$)。见表 4。

Table 4. Multivariable logistic regression analysis of factors associated with OVCF
表 4. OVCF 影响因素的多因素 Logistic 回归分析

变量	β 值	标准误	Wald χ^2	OR 值	95% CI	P 值
年龄 ≥ 75 岁	0.663	0.324	4.187	1.940	1.027~3.665	0.041
BMI	-0.089	0.062	2.061	0.915	0.811~1.032	0.151
既往脆性骨折史	0.824	0.410	4.039	2.280	1.020~5.095	0.044
长期糖皮质激素使用史	0.399	0.539	0.548	1.490	0.518~4.284	0.459
L1 椎体 CT 值(每 10 HU)	-0.281	0.070	16.114	0.755	0.658~0.867	<0.001
椎旁肌肉总横截面积(每 5 cm ²)	-0.323	0.134	5.810	0.724	0.557~0.942	0.016
椎旁肌肉密度(每 5 HU)	-0.355	0.108	10.805	0.701	0.568~0.866	0.001

注：OR 为优势比，CI 为置信区间。OR < 1 表示该指标升高与 OVCF 发生可能性降低相关。

3.5. 联合模型辅助识别效能分析

以年龄 ≥ 75 岁、BMI、既往脆性骨折史、L1 椎体 CT 值、椎旁肌肉总横截面积及椎旁肌肉密度构建联合模型。ROC 分析显示，L1 椎体 CT 值、椎旁肌肉密度、探索性骨 - 肌耦合评分及联合模型的曲线下面积分别为 0.692、0.709、0.796 和 0.805。联合模型曲线下面积较“临床变量 + L1 椎体 CT 值”模型提高 0.057，差异有统计学意义(DeLong 检验 $P = 0.026$)。联合模型 Hosmer-Lemeshow 检验 $P = 0.312$ ，Bootstrap 校正后校准斜率为 0.94。阈值概率为 15%~65% 时，联合模型净获益高于“全部干预”“均不干预”及“临床变量 + L1 椎体 CT 值”模型。加入椎旁肌肉参数后，连续净重分类改善指数为 0.284 (95% CI: 0.071~0.503)，综合判别改善指数为 0.061 (95% CI: 0.018~0.105)。见表 5、见图 1、见图 2。

Table 5. ROC curve analysis of individual indicators and the combined model for aiding identification of OVCF
表 5. 各指标及联合模型辅助识别 OVCF 的 ROC 曲线分析

指标	曲线下面积	95% CI	最佳截断值	敏感度(%)	特异度(%)
临床变量模型	0.701	0.626~0.776	0.381	66.70	65.30
临床变量 + L1 CT 模型	0.748	0.679~0.817	0.366	73.60	66.10
L1 椎体 CT 值	0.692	0.619~0.765	107.800 HU	70.80	58.90
椎旁肌肉总横截面积	0.641	0.564~0.717	36.400 cm ²	65.30	56.50
身高校正肌肉指数	0.653	0.576~0.730	13.900 cm ² /m ²	66.70	57.30
椎旁肌肉密度	0.709	0.637~0.781	34.600 HU	76.40	58.10
骨 - 肌耦合评分	0.796	0.731~0.861	-0.236	77.80	70.20
联合模型	0.805	0.741~0.869	0.358	79.20	71.00

注：联合模型包括年龄 ≥ 75 岁、BMI、既往脆性骨折史、L1 椎体 CT 值、椎旁肌肉总横截面积及椎旁肌肉密度。

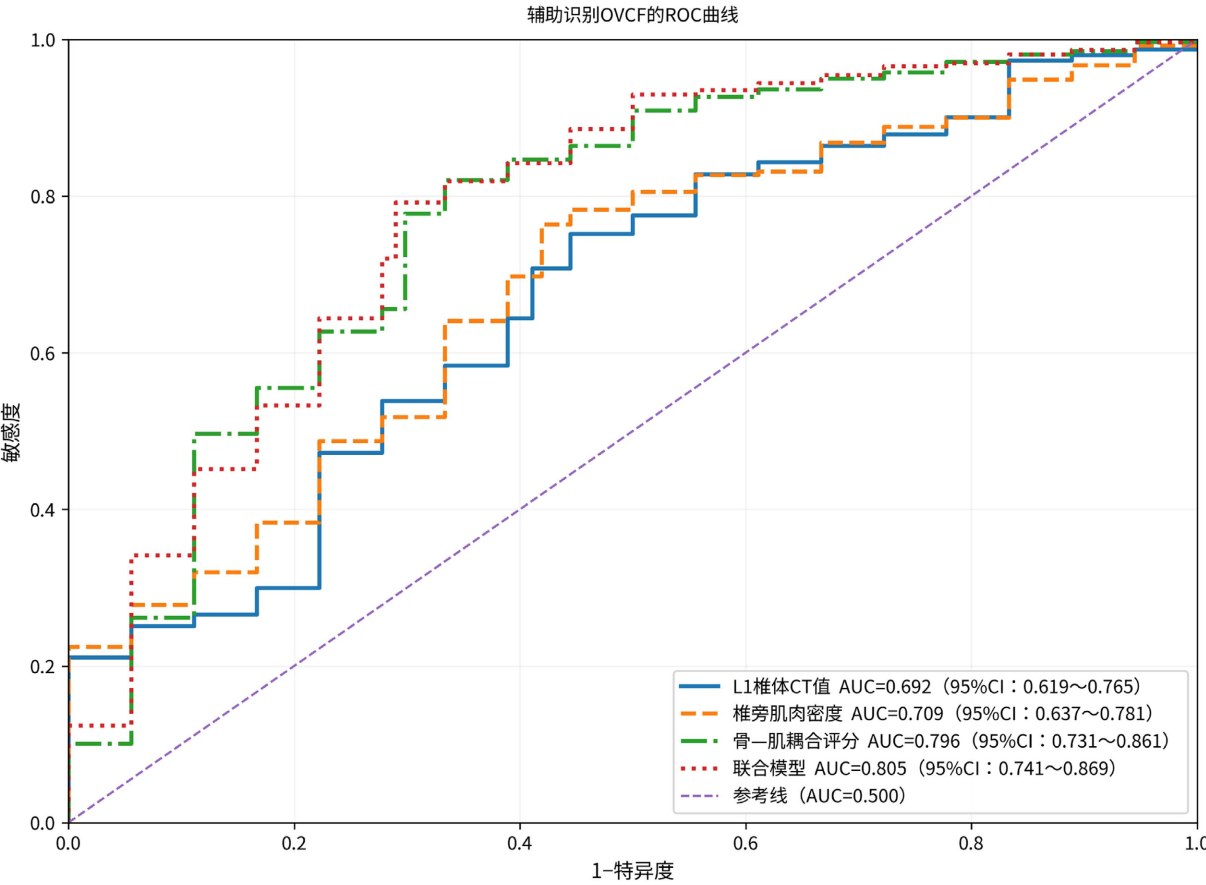


Figure 1. ROC curves of L1 vertebral CT attenuation, paraspinal muscle density, bone-muscle coupling score, and the combined model for aiding identification of OVCF

图 1. L1 椎体 CT 值、椎旁肌肉密度、骨 - 肌耦合评分及联合模型辅助识别 OVCF 的 ROC 曲线

4. 讨论

本研究基于常规胸腹部 CT 建立 L1 椎体骨衰减与椎旁肌肉退变的联合评估框架。结果显示，OVCF

组既存在 L1 椎体 CT 值降低, 也存在椎旁肌肉面积减少、密度下降和脂肪浸润增加; 多因素分析显示年龄 ≥ 75 岁、既往脆性骨折史及 3 项 CT 定量指标与 OVCF 相关。联合模型较临床变量 + L1 椎体 CT 值模型具有更高区分度, 并表现出较好的校准度及一定临床净获益, 提示骨与肌肉信息具有互补价值。

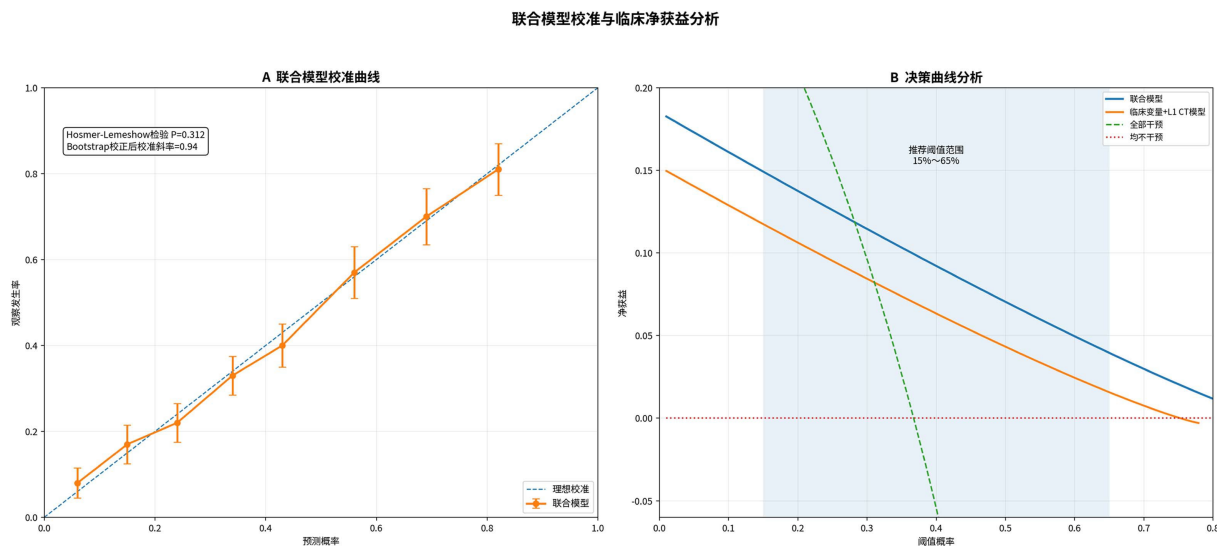


Figure 2. Calibration curve (A) and decision curve analysis (B) of the combined model

图 2. 联合模型校准曲线(A)及决策曲线分析(B)

一般资料比较显示, OVCF 组年龄较高、BMI 较低, 既往脆性骨折、近期低能量损伤及腰背痛比例较高, 同时部分营养和骨代谢相关实验室指标较差。年龄增长可伴随骨小梁减少、肌肉量下降和姿势控制能力减弱; 既往脆性骨折则提示持续存在的骨骼脆弱状态。近期低能量损伤和腰背痛与既有骨折判定密切相关, 故本研究仅用于描述组间差异, 未纳入主模型, 以避免循环解释。

L1 椎体 CT 值在 OVCF 组明显降低, 最佳截断值为 107.800 HU, 曲线下面积为 0.692。既往研究表明, 常规 CT 椎体 HU 值可用于机会性低骨量筛查[15]。本研究结果与上述研究方向一致, 但单一椎体 CT 值的区分度有限, 可能与扫描设备、重建算法、层厚及病例构成差异有关。因此, L1 椎体 CT 值更适合作为进一步 DXA 或骨代谢评估的提示指标, 而不应单独替代骨质疏松临床诊断。

OVCF 组椎旁肌肉总横截面积、身高校正肌肉指数及肌肉密度降低, 肌肉脂肪浸润指数升高。椎旁肌肉参与脊柱稳定、姿势控制及轴向负荷分担, 肌肉量和肌肉质量下降可能增加轻微外力下椎体受压及跌倒风险。既往研究亦报道骨质量与椎旁肌肉质量共同下降与脆性 OVCF 相关, 椎旁肌肉退变与骨质疏松性椎体骨折发生或复发相关[16]。本研究多因素分析中, 椎旁肌肉总横截面积和密度在校正临床变量及 L1 椎体 CT 值后仍有统计学意义, 进一步支持骨 - 肌联合评估。

联合模型曲线下面积为 0.805, 高于临床变量 + L1 椎体 CT 值模型, 且 DeLong 检验差异有统计学意义。Hosmer-Lemeshow 检验和 Bootstrap 校正后校准斜率提示模型预测概率与观察结果总体一致; 决策曲线显示, 在 15%~65% 的阈值概率范围内联合模型具有较高净获益。连续净重分类改善指数和综合判别改善指数也表明, 椎旁肌肉参数可在椎体 CT 值基础上提供一定增量信息。上述结果与椎旁肌肉参数用于椎体骨折风险分层及联合模型构建的研究相呼应。骨 - 肌耦合评分采用标准化后等权合成, 主要作为探索性指标, 其权重尚未经过主成分分析等数据驱动方法优化, 因此不作为主模型核心指标, 相关结果需谨慎解释。

在临床应用中,可在常规胸腹部 CT 阅片时同步观察 L1 椎体松质骨衰减及同层面椎旁肌肉面积、密度和脂肪浸润。对于 L1 椎体 CT 值较低或椎旁肌肉明显退变的老年患者,建议结合既往脆性骨折史、跌倒风险、营养状态、维生素 D 水平及抗骨质疏松治疗史,进一步完善 DXA 和骨代谢评估。该流程不增加辐射剂量,但人工勾画耗时且存在观察者依赖性。后续可基于人工智能特别是深度学习方法,实现 L1 椎体和椎旁肌肉的自动识别、分割与参数量化,有望将以分钟计的人工测量缩短至秒级自动化处理,同时提高效率和一致性,这也是推动机会性筛查进入临床常规应用的重要环节[17]-[19]。

本研究存在以下局限:第一,为单中心回顾性横断面研究,样本量有限,模型反映的是既有 OVCF 相关特征,不能直接解释因果关系或预测未来骨折;第二,25(OH)D、白蛋白、eGFR 等临床重要变量未纳入主模型,可能存在残余混杂;后续在扩大样本量并提高资料完整性的基础上,应将上述变量纳入多因素分析进行更充分的混杂调整;第三,椎体 CT 值受扫描参数和重建算法影响,椎旁肌肉采用二维单层测量,外推性有限;第四,伦理批准号及知情同意豁免信息尚需作者依据正式批件核实。今后应开展多中心[20]、前瞻性随访研究,统一扫描和测量流程,进行外部验证、阈值校准及自动化分析。

5. 结论

本研究结果表明,常规胸腹部 CT 中的 L1 椎体 CT 值降低、椎旁肌肉总横截面积减少及椎旁肌肉密度下降与老年 OVCF 相关;整合临床变量、L1 椎体 CT 值和椎旁肌肉参数的联合模型可提高辅助识别效能。临床阅片时可将骨-肌联合评估作为进一步 DXA、骨代谢、营养及跌倒风险评估的提示路径。鉴于本研究为单中心回顾性分析,模型阈值和效能尚需多中心、前瞻性研究进行外部验证和重新校准。

声 明

本研究经中国人民解放军西部战区总医院医学伦理委员会审核批准(伦理批准号:2023EC-017)。由于本研究为回顾性研究,采用既往临床及影像资料,且所有患者资料均在分析前进行匿名化处理,伦理委员会批准豁免患者书面知情同意。

参考文献

- [1] North American Spine Society (2024) Diagnosis and Treatment of Adults with Osteoporotic Vertebral Compression Fractures: Evidence-Based Clinical Guideline. North American Spine Society.
- [2] Praveen, A.D., Sollmann, N., Baum, T., Ferguson, S.J. and Benedikt, H. (2024) CT Image-Based Biomarkers for Opportunistic Screening of Osteoporotic Fractures: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Osteoporosis International*, **35**, 971-996. <https://doi.org/10.1007/s00198-024-07029-0>
- [3] Gregson, C.L., Armstrong, D.J., Avgerinou, C., Bowden, J., Cooper, C., Douglas, L., et al. (2025) The 2024 UK Clinical Guideline for the Prevention and Treatment of Osteoporosis. *Archives of Osteoporosis*, **20**, Article No. 119. <https://doi.org/10.1007/s11657-025-01588-3>
- [4] Chaisen, M., Sritara, C., Chitrapazt, N., Suppasilp, C., Chamroonrat, W., Promma, S., et al. (2024) Opportunistic Screening for Osteoporosis by CT as Compared with DXA. *Diagnostics*, **14**, Article 2846. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14242846>
- [5] Wang, X.Y., Pan, S., Liu, W.F., et al. (2024) Vertebral HU Value and the Pectoral Muscle Index Based on Chest CT Can Be Used to Opportunistically Screen for Osteoporosis. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **19**, Article No. 335. <https://doi.org/10.1186/s13018-024-04825-6>
- [6] Zhang, J.F., Luo, X.H., Zhou, R.L., et al. (2024) The Suitable Population for Opportunistic Low Bone Mineral Density Screening Using Computed Tomography. *Clinical Interventions in Aging*, **19**, 807-815. <https://doi.org/10.2147/cia.s461018>
- [7] Sebro, R. and De la Garza-Ramos, C. (2023) Opportunistic Screening for Osteoporosis and Osteopenia from CT Scans of the Abdomen and Pelvis Using Machine Learning. *European Radiology*, **33**, 1812-1823. <https://doi.org/10.1007/s00330-022-09136-0>
- [8] Yu, J.M., Xiao, Z.G., Yu, R.H., et al. (2024) Diagnostic Value of Hounsfield Units for Osteoporotic Thoracolumbar

- Vertebral Non-Compression Fractures in Elderly Patients with Low-Energy Injuries. *International Journal of General Medicine*, **17**, 3221-3229. <https://doi.org/10.2147/ijgm.s471770>
- [9] Feng, N.N., Zhou, S.B., Yu, X., *et al.* (2024) Feasibility Study in Quantitative Identification of Fresh and Old Osteoporotic Vertebral Compression Fracture by Vertebral CT Value and CT Value Difference. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **25**, Article No. 821. <https://doi.org/10.1186/s12891-024-07936-7>
- [10] Zhan, S.Z., Ma, H.N., Duan, X.G., *et al.* (2024) The Quality of Bone and Paraspinal Muscle in the Fragility Osteoporotic Vertebral Compression Fracture: A Comprehensive Comparison between Different Indicators. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **25**, Article No. 471. <https://doi.org/10.1186/s12891-024-07587-8>
- [11] Mai, C.H., Liu, Y.D., Xu, D.F., *et al.* (2024) Role of Effective Atomic Number of Paraspinal Muscles in the Prediction of Acute Vertebral Fracture Risk Assessment: A Cross-Sectional Case-Control Study. *British Journal of Radiology*, **97**, 1437-1442. <https://doi.org/10.1093/bjr/tqae112>
- [12] Tang, M., Zhang, G.D., Zeng, F.Y., *et al.* (2024) Paraspinal Muscle Parameters' Predictive Value for New Vertebral Compression Fractures Post-Vertebral Augmentation: Nomogram Development and Validation. *Frontiers in Medicine*, **11**, Article 1379078. <https://doi.org/10.3389/fmed.2024.1379078>
- [13] Xiong, Y.C., Zhang, C.C., Chen, X.P., *et al.* (2024) Prediction of Subsequent Vertebral Fracture after Acute Osteoporotic Fractures from Clinical and Paraspinal Muscle Features. *Calcified Tissue International*, **114**, 614-624. <https://doi.org/10.1007/s00223-024-01209-0>
- [14] Wang, S., Zhang, X., Zheng, J.Y., *et al.* (2025) Integration of Spinal Musculoskeletal System Parameters for Predicting OVCF in the Elderly: A Comprehensive Predictive Model. *Global Spine Journal*, **15**, 1966-1975. <https://doi.org/10.1177/21925682241274371>
- [15] Peng, T., Zeng, X.H., Li, Y., *et al.* (2024) A Study on Whether Deep Learning Models Based on CT Images for Bone Density Classification and Prediction Can Be Used for Opportunistic Osteoporosis Screening. *Osteoporosis International*, **35**, 117-128. <https://doi.org/10.1007/s00198-023-06900-w>
- [16] Chen, Z., Shi, T.B., Li, W.W., *et al.* (2023) Role of Paraspinal Muscle Degeneration in the Occurrence and Recurrence of Osteoporotic Vertebral Fracture: A Meta-Analysis. *Frontiers in Endocrinology*, **13**, Article 1073013. <https://doi.org/10.3389/fendo.2022.1073013>
- [17] Paderno, A., Ataide Gomes, E.J., Gilberg, L., Maerkisch, L., Teodorescu, B., Koç, A.M., *et al.* (2024) Artificial Intelligence-Enhanced Opportunistic Screening of Osteoporosis in CT Scan: A Scoping Review. *Osteoporosis International*, **35**, 1681-1692. <https://doi.org/10.1007/s00198-024-07179-1>
- [18] 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>
- [19] Bendtsen, M.G. and Hitz, M.F. (2024) Opportunistic Identification of Vertebral Compression Fractures on CT Scans of the Chest and Abdomen, Using an AI Algorithm, in a Real-Life Setting. *Calcified Tissue International*, **114**, 468-479. <https://doi.org/10.1007/s00223-024-01196-2>
- [20] Petraikin, A.V., Pickhardt, P.J., Belyaev, M.G., Belaya, Z.E., Pisov, M.E., Bukharaev, A.N., *et al.* (2025) Opportunistic Screening for Osteoporosis Using Artificial Intelligence-Based Morphometric Analysis of Chest Computed Tomography Images. *Asian Spine Journal*, **19**, 355-371. <https://doi.org/10.31616/asj.2024.0314>