

基于 MRI 椎体和终板骨质量评分对经椎间孔椎间融合术后 cage 沉降的预测价值

罗 顿, 陈 骞, 艾有为, 朱 策, 王珏翰, 丁 鸿, 刘立岷

四川大学华西医院骨科, 四川 成都 610000

【摘要】 目的 探讨基于 MRI 的椎体骨质量评分 (vertebral bone quality score, VBQ) 和终板骨质量评分 (endplate bone quality score, EBQ) 在经椎间孔腰椎椎间融合 (transforaminal lumbar interbody fusion, TLIF) 术后 cage 沉降中的预测价值。**方法** 因腰椎退行性疾病在我院行 TLIF 手术的 226 例患者, 根据术后有无 cage 沉降将患者分为沉降组和非沉降组, 比较两组患者 VBQ 和 EBQ 评分。通过多元回归分析 cage 沉降的危险因素, 并根据受试者工作特征曲线下面积 (AUC) 评估 VBQ 和 EBQ 预测 TLIF 术后 cage 沉降的能力。**结果** 226 例患者中 30 例出现术后 cage 沉降。沉降组 VBQ (3.8 ± 0.4) 分, EBQ (5.1 ± 0.7) 分, 明显高于非沉降组 (3.1 ± 0.6) 分和 (4.2 ± 1.0) 分, 差异有统计学意义 ($P < 0.001$)。多元回归分析显示 VBQ ($OR = 4.258$, 95% CI: 1.983 ~ 9.142, $P < 0.001$) 和 EBQ ($OR = 1.971$, 95% CI: 1.212 ~ 3.203, $P = 0.006$) 评分越高, 发生 cage 沉降风险也越大。受试者工作特征曲线结果显示 VBQ 的 AUC 为 0.843, EBQ 的 AUC 是 0.864。VBQ 和 EBQ 预测 cage 沉降的最佳阈值分别为 3.480 (敏感性 90%; 特异性 75.5%) 和 4.620 (敏感性 96.7%; 特异性 74.5%)。**结论** 术前 VBQ 或 EBQ 评分越高, TLIF 术后发生 cage 沉降风险越大。其中 EBQ 可能是一个更好的预测融合术后 cage 沉降的指标。

【关键词】 椎体骨质量评分; 终板骨质量评分; 磁共振; 经椎间孔椎间融合术; Cage 沉降

【中图分类号】 R687.3 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1672-6170(2024)03-0020-06

Predictive value of MRI-based vertebral bone quality score and endplate bone quality score for cage subsidence after transforaminal lumbar interbody fusion LUO Dun, CHEN Qian, AI Youwei, ZHU Ce, WANG Jue-han, DING Hong, LIU Li-min *Department of Orthopedic Surgery and Orthopedic Research Institute, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China*

【Corresponding author】 LIU Li-min

【Abstract】 Objective To explore the predictive value of MRI-based vertebral bone quality (VBQ) score and endplate bone quality (EBQ) score for cage subsidence after transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF). **Methods** Two hundred and twenty-six patients undergoing TLIF for degenerative lumbar disease in our hospital were selected. The patients were divided into a subsidence group and a non-subsidence group according to whether there was cage subsidence after surgery. The scores of VBQ and EBQ were compared between the two groups. Risk factors for cage subsidence were investigated by using multivariate logistic regression analysis. The VBQ and EBQ scores were assessed for their ability to predict cage subsidence in patients based on the area under the receiver operative characteristic curve (AUC). **Results** Among the 226 patients, there were 30 with cage subsidence. The VBQ scores were (3.8 ± 0.4) and the EBQ scores were (5.1 ± 0.7) in the subsidence group. These were significantly higher than VBQ scores (3.1 ± 0.6) and EBQ scores (4.2 ± 1.0) in the non-subsidence group ($P < 0.001$). Multiple regression analysis showed that a higher risk of subsidence was associated with a higher VBQ score ($OR = 4.258$, 95% CI: 1.983 ~ 9.142, $P < 0.001$) and a higher EBQ score ($OR = 1.971$, 95% CI: 1.212 ~ 3.203, $P = 0.006$). The ROC curve analysis showed that the AUC of VBQ was 0.843 and the AUC of EBQ was 0.864, respectively. The optimal thresholds for VBQ and EBQ scores to predict cage subsidence were 3.480 (sensitivity = 90% and specificity = 75.5%) and 4.620 (sensitivity = 96.7% and specificity = 74.5%), respectively. **Conclusions** The higher the preoperative VBQ or EBQ scores, the higher the risk of postoperative cage subsidence after TLIF. Among the two indicators, EBQ may be a better predictor of cage subsidence after fusion.

【Key words】 Vertebral bone quality score; Endplate bone quality score; MRI; TLIF; Cage subsidence

【基金项目】 四川省科技厅重大科技专项 (编号: 2022ZDZX0029)

【通讯作者简介】 刘立岷, 男, 主任医师, 教授, 硕士/博士研究生导师。中华医学会骨科分会基础学组委员, 中国医药教育协会第三届骨科脊柱分会脊柱畸形工作组副组长, 中国医师协会脊柱畸形专委会委员, 中国康复医学会脊柱脊髓专业委员会脊柱畸形学组委员, 中国医师协会骨科医师分会骨与关节发育畸形与残疾工作委员会委员, 中华医学会医学工程分会第五届委员会数字骨科学组委员, 中国整形美容协会抗衰老分会理事, 白求恩公益基金会骨科基层教育委员会常务委员, 中华医学会四川省骨科分会脊柱外科学组委员。研究方向: 脊柱畸形、脊柱退变的基础和临床研究。

cage 沉降是经椎间孔椎间融合术后 (transforaminal lumbar interbody fusion, TLIF) 常见并发症之一, 有文献报道其发生率可高达 38%^[1, 2]。cage 沉降的发生可导致椎间隙高度丢失、增加融合失败和临近节段退变风险, 进而对手术效果产生不利影响^[3]。因此, 在术前对患者 cage 沉降发生风险进行评估是非常重要的和必要的。虽然研究发现 cage 沉降受到多种因素的影响, 但低骨密度 (bone mineral density, BMD) 仍然是 TLIF 融合术后 cage 沉降发生的重要危险因素之一^[3]。双能 X 射线吸

收测定 (dual-energy X-ray absorptiometry, DXA) 是目前临床工作中常用的骨密度测定方法。然而,研究发现腰椎退行性变可能对 DXA 的准确性产生影响^[4, 5]。同时,根据国际临床骨测量学会 (the international society for clinical densitometry, ISCD) 的推荐,DXA 检测并不能作为腰椎融合术前的常规检查^[6]。

最近研究发现基于 MRI 的椎体骨质量评分 (vertebral bone quality score, VBQ) 有望成为 DXA 的潜在替代方法,其通过评估椎体骨小梁的脂肪浸润程度,来反映骨质量状态^[7]。多项研究已证实基于 MRI 对评估骨质量是可靠的骨密度评估指标^[1, 8, 9]。在前期的研究中发现,VBQ 预测腰椎融合术后 cage 沉降的准确性优于 DXA^[9, 10]。此外,有研究发现终板变化可能是导致腰椎融合术后 cage 沉降的重要原因^[11]。两项基于 CT 的研究结果显示终板骨密度与 cage 沉降之间有着更为密切的关系^[12, 13]。随着对 MRI 评估椎体骨质量的深入理解,研究发现基于 MRI 的终板骨质量评分 (endplate bone quality score, EBQ) 也是一个有效的腰椎融合术后 cage 沉降的预测指标^[2, 14]。但关于 VBQ 和 EBQ 谁是更好的 TLIF 术后 cage 沉降的预测指标,目前的研究相对缺乏。因此,本研究拟通过回顾性分析比较 VBQ 和 EBQ 在预测 TLIF 术后 cage 沉降中的作用,现报道如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性分析 2014 ~ 2020 年在四川大学华西医院因腰椎退行性疾病行单节段 TLIF 手术治疗的 226 例患者临床资料。纳入标准:①患者因腰椎退行性疾病入院且计划行单节段 TLIF 手术治疗,包括腰椎管狭窄、退行性腰椎滑脱、峡部裂性滑脱和腰椎间盘突出症;②患者具有术前 1 周内的腰椎 X 射线、腰椎 CT 和腰骶磁共振成像 (MRI) 扫描资料;③术后随访至少 1 年,随访包括腰椎 X 射线或腰椎 CT。排除标准:①患者年龄小于 18 岁;接受多节段 TLIF 手术;②曾经有腰椎手术史或合并 Schmorl's 结节、脊柱侧弯、脊柱肿瘤、脊柱感染、脊柱创伤、异常骨代谢性疾病等;③随访时间小于 1 年或随访资料不全。根据术后有无 cage 沉降将患者分为沉降组和非沉降组,其中非沉降组 196 例,男 79 例,女 117 例,年龄 18-81 岁 $[(56.9 \pm 13.3)$ 岁]; BMI 指数 17.1 ~ 32.0 kg/m² $[(23.9 \pm 3.1)$ kg/m²]。沉降组 30 例,男 8 例,女 22 例,年龄 29 ~ 75 岁 $[(60.4 \pm 10.0)$ 岁]; BMI 指数 18.4 ~ 30.5 kg/m² $[(23.9 \pm 3.3)$ kg/m²]。两组患者一般资料比较差异无统计学意义 ($P > 0.05$),见表 1。所有患者均使用 PEEK 融合器 (Capstone, Medtronic Sofamor Danek, MN, USA)。本研究经过四川大学华西医院医学伦理委员会批准 (编号:2023-250)。

表 1 两组患者一般临床资料比较

参数	非沉降组 (n=196)	沉降组 (n=30)	P
年龄 (岁)	56.9±13.3	60.4±10.0	0.163
性别[n(%)]			0.153
男	79 (40.3)	8 (26.7)	
女	117 (59.7)	22 (73.3)	
BMI (kg/m ²)	23.9±3.1	23.9±3.3	0.990
吸烟[n(%)]			0.463
是	41 (20.9)	4 (13.3)	
否	155 (79.1)	26 (86.7)	
饮酒[n(%)]			0.440
是	33 (16.8)	7 (23.3)	
否	163 (83.2)	23 (76.7)	
查尔森合并症指数[n(%)]			0.956
0 分	19 (9.7)	3 (10.0)	
1 分	60 (30.6)	10 (33.3)	
≥2 分	117 (59.7)	17 (56.7)	
糖尿病[n(%)]	28 (14.3)	5 (16.7)	0.781
高血压[n(%)]	60 (30.6)	14 (46.7)	0.081
术前诊断[n(%)]			0.419
腰椎管狭窄	118 (60.2)	18 (60.0)	
退行性腰椎滑脱	45 (23.0)	4 (13.3)	
峡部裂性滑脱	21 (10.7)	5 (16.7)	
腰椎间盘突出	12 (6.1)	3 (10.0)	
手术节段[n(%)]			0.303
L1/2	4 (2.0)	1 (3.3)	

参数		非沉降组 (n=196)	沉降组 (n=30)	P
	L2/3	2 (1.0)	0	
	L3/4	7 (3.6)	2 (6.7)	
	L4/5	107 (54.6)	20 (66.7)	
	L5/S1	76 (38.8)	7 (23.3)	
术中出血量 (ml)		150.0 (100.00, 200.00)	160.0 (60.0, 210.0)	0.687
随访时间 (月)		19.5 (14.0, 26.75)	18.0 (16.0, 23.0)	0.550
Cage 尺寸 (mm)	长	24.4±1.9	24.5±1.9	0.809
	高	11.6±1.1	11.6±0.8	0.992
	宽	10.3±1.5	10.5±1.6	0.642
术前椎间盘高度 (%)		52.7±14.8	51.2±18.1	0.627
术后即刻椎间盘高度 (%)		67.5±13.1	70.6±21.5	0.445
椎间盘高度改变比		1.4±0.5	1.6±0.7	0.057

1.2 VBQ 和 EBQ 评分测量方法 VBQ 和 EBQ 评分均在腰椎 T1 加权 MRI 的正中矢状面图像上测量 (图 1)。在计算 VBQ 评分时,将感兴趣区域 (ROI) 分别放置于 L1 至 L4 椎体的髓质部分和 L3 水平的脑脊液 (CSF) 处,获得平均信号强度 (SI)。放置椎体 ROI 时,注意距椎体外周 3 mm 内以便排除骨皮质的影响。VBQ 评分计算公式:VBQ 评分=中位数 (SI_{L1~L4})/SI_{L3-CSF}。在计算 EBQ 评分时,将 ROI 放置在手术节段上下椎体距离软骨终板 3 mm 处的终板下骨和 L3 水平的 CSF 处。EBQ 评分计算公式:EBQ 评分=平均值 (SI_{上下终板})/SI_{L3-CSF}。若无法在正中矢状面上放置 ROI,我们将使用旁矢状面图像。若因椎管狭窄等梗阻因素无法测量 L3 处 CSF 的 SI,我们将使用 L2 或 L4 水平的 CSF。

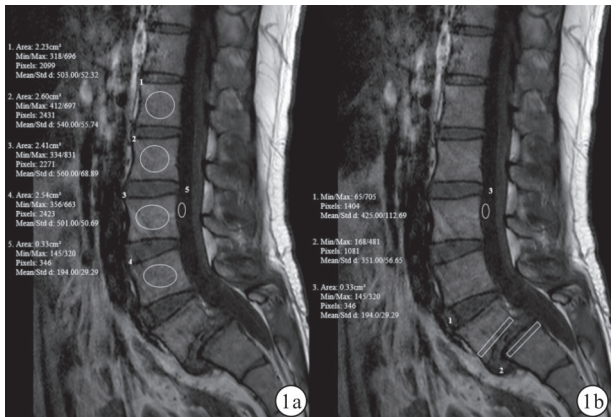


图1 VBQ 和 EBQ 评分计算方法 a:VBQ 评分计算;b:EBQ 评分计算

1.3 影像学观察指标 除 VBQ 和 EBQ 评分外,通过术前和术后即刻的腰椎 X 射线计算椎间盘高度,使用末次随访时的腰椎 CT 评估是否发生 cage 沉降。椎间盘高度通过 Farfan 指数计算:椎间盘高度=[(椎间盘前矢状面高度 a + 椎间盘后矢状面高度 b) / 椎间盘矢状面宽度 c]×100% (图 2)。椎间盘

高度改变比=术后即刻椎间盘高度 / 术前椎间盘高度。当 cage 突入椎体终板超过 2 mm 时,可评估为 cage 沉降。

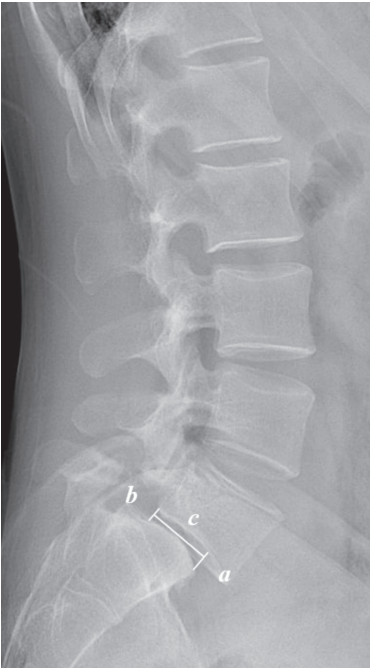


图2 椎间盘高度计算 a:椎间盘前矢状面高度;b:椎间盘后矢状面高度;c:椎间盘矢状面宽度

1.4 随访 患者临床相关结果通过背部和腿部的视觉模拟评分量表 (VAS)^[15] 和 Oswestry 功能障碍指数 (ODI)^[16] 进行评估。VAS 量表 0~10 分,分数越高疼痛越严重;ODI 指数共 10 个问题,每个问题按 0~5 分计分,(实际得分/最高可能得分)×100% 即为 ODI 指数。所有患者报告结果均在术前、术后第 3 月和术后末次进行评估。

1.5 统计学方法 应用 SPSS 26.0 统计学软件分析数据。正态分布的计量资料以均数±标准差表示,组间比较采用 t 检验;非正态分布的计量资料以 M (P₂₅, P₇₅) 表示,组间比较采用 Mann Whitney U

检验。计数资料以例数(%)表示,组间比较采用卡方检验。通过多元回归分析筛选 cage 沉降影像学危险因素。根据受试者工作特征曲线(ROC)计算曲线下面积(AUC)来评估 VBQ 和 EBQ 评分预测融合器沉降的能力,并计算出约登指数,得出最佳预测临界值。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组患者 VBQ 和 EBQ 评分比较 沉降组 VBQ 和 EBQ 评分均高于非沉降组,差异有统计学意义($P<0.001$)。见表 2。

表 2 两组 VBQ 和 EBQ 评分比较(分)

组别	VBQ 评分	EBQ 评分
沉降组($n=30$)	3.8±0.4	5.1±0.6
非沉降组($n=196$)	3.1±0.6	4.2±1.0
t	-7.534	-7.020
P	<0.001	<0.001

2.2 cage 沉降危险因素分析 Logistic 多元回归分析显示,VBQ 和 EBQ 评分均为 cage 沉降的危险因素($P<0.05$)。见表 3。

表 3 cage 沉降危险因素 Logistic 多元回归分析

因素	β	SE	Wald χ^2	OR	95% CI	P
术前椎间盘高度	-0.020	0.016	1.563	0.980	0.949 ~ 1.012	0.211
术后即刻椎间盘高度	0.025	0.017	2.237	1.026	0.992 ~ 1.060	0.135
椎间盘高度改变	0.491	0.361	1.845	1.634	0.805 ~ 3.317	0.174
VBQ 评分	1.449	0.390	13.806	4.258	1.983 ~ 9.142	<0.001
EBQ 评分	0.678	0.248	7.490	1.971	1.212 ~ 3.203	0.006

2.3 VBQ 和 EBQ 评分在 cage 沉降中预测价值

VBQ 评分的 AUC 为 0.843,约登指数为 0.655,临界值为 3.480,敏感度 90.0%、特异度 75.5%;EBQ 评分的 AUC 为 0.864,约登指数为 0.712,临界值为 4.620,敏感度 96.7%、特异度 74.5%。见图 3。

2.4 两组患者手术前后 VAS 评分及 ODI 评分比较 两组患者手术前后 VAS 评分及 ODI 评分比较,差异均无统计学意义($P>0.05$)。见表 4。

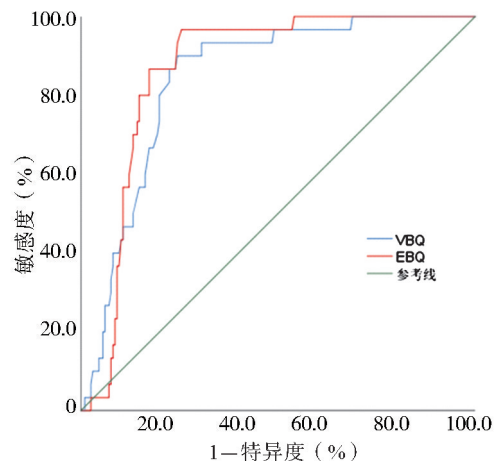


图 3 VBQ、EBQ 评分诊断 cage 沉降的 ROC 曲线

表 4 两组患者手术前后 VAS 评分及 ODI 评分比较(分)

参数		非沉降组($n=196$)	沉降组($n=30$)	t	P
腰痛 VAS 评分	术前	7.3±0.8	7.0±1.0	1.431	0.154
	术后 3 月	3.3±1.1	3.1±1.2	1.187	0.237
	术后末次	1.9±0.8	1.8±0.7	0.315	0.753
腿痛 VAS 评分	术前	6.5±1.1	6.7±0.9	-1.292	0.198
	术后 3 月	2.8±0.9	3.0±1.0	-1.569	0.118
	术后末次	1.5±0.9	1.6±0.8	-0.444	0.658
ODI 评分	术前	37.1±4.7	37.9±4.2	-0.838	0.403
	术后 3 月	22.2±5.5	21.6±4.2	0.613	0.540
	术后末次	10.6±4.4	11.9±4.2	-1.585	0.114

3 讨论

本研究探讨了 VBQ 和 EBQ 在 TLIF 术后 cage 沉降中的预测价值。研究结果显示无论 VBQ 或 EBQ 都是可靠的预测腰椎融合术后 cage 沉降有效指标。ROC 结果显示,VBQ 和 EBQ 预测 TLIF 术后

cage 沉降的最佳阈值分别为 3.480 和 4.620。其中,EBQ 可能有更好的预测能力。

本研究回顾了 226 例因腰椎退行性疾病行单节段 TLIF 手术的患者,其中有 30 例患者出现了术后 cage 沉降。非沉降组和沉降组术前 VBQ 和 EBQ 有

着显著性差异,非沉降组 VBQ 和 EBQ 值分别为 (3.1 ± 0.6) 分和 (4.2 ± 1.0) 分;沉降组 VBQ 和 EBQ 分别为 (3.8 ± 0.4) 分和 (5.1 ± 0.7) 分。研究发现随着脂肪细胞浸润骨小梁,骨密度也随之降低,此时骨小梁在 MRI T1 加权像上信号强度也显著增高^[17]。而两组年龄、性别、cage 尺寸等基线资料差异无统计学意义。此外,多元回归分析显示 VBQ 和 EBQ 均是 TLIF 术后 cage 沉降的独立危险因素。这与先前的研究结果类似^[1, 14, 18]。腰椎 MRI 作为常规的术前检查,所以脊柱外科医师很容易对 VBQ 和 EBQ 进行测量。而 MRI 作为无辐射检查,避免来 DXA 和 CT 带来的辐射危害^[19, 20]。此外,VBQ 和 EBQ 的测量方法 H 可避免因腰椎退行性改变带来的不利影响^[21]。ROC 结果显示 EBQ 的预测价值稍好于 VBQ,它们的 AUC 分别为 0.864 和 0.843,VBQ 和 EBQ 都是可靠的预测指标。其中 EBQ 的 AUC 稍大于 VBQ,这可能因为对终板这类特定位置的骨密度测量比整体骨密度测量有更好的预测 cage 沉降能力。

有研究发现与测量整个椎体 BMD 相比较,特定位置 BMD 测量有更好的并发症预测能力。Sakai 等^[22]和 Li 等^[23]都发现螺钉轨迹 BMD 是比椎体 BMD 更好的预测术后螺钉松动的指标。此外也有研究发现在预测骨质疏松椎体骨折方面,终板 BMD 也是优于全椎体 BMD 的指标^[24]。本研究结果显示在预测 TLIF 术后 cage 沉降方面 EBQ 稍优于 VBQ,此结果与 Jones 等的研究结果相似。Jones 等研究发现在行 LLIF 患者,EBQ 是一个可靠的预测术后 cage 沉降的指标,而 VBQ 与 cage 沉降之间的关系并不显著^[14]。这可能是由于终板是 cage 与椎体之间的接触面,在分配来自 cage 压缩负荷方面发挥着重要作用。终板的改变可导致力学分布的改变,进而导致 cage 沉降的发生^[25]。

虽然以往有研究发现 cage 沉降可能导致椎间融合失败、神经症状复发等,甚至需再次翻修手术治疗^[3]。但在本研究中,沉降组与非沉降组之间腰痛和腿痛的 VAS 评分和 ODI 评分并无统计学差异,且两组患者术后结果均较术前有明显改善。先前研究中也发现似乎 cage 沉降并不会对手术效果产生影响^[26]。然而,Marchi 等发现 cage 沉降与术后临床改善恶化有着密切关系^[27]。Cage 沉降与临床效果之间的关系一直存在争议,研究认为临床效果的变化可能与 cage 沉降的严重程度息息相关。当 cage 沉降严重时,椎间盘高度和椎间隙高度都明显降低^[28]。因此需要更长期的随访,以及对 cage 沉降程度与临床效果之间关系的更细致的研究。

综上,本研究结果显示 VBQ 和 EBQ 都是预测 TLIF 术后 cage 沉降的简便、可靠的指标。其中,EBQ 展现出更好的预测能力。因此,无论 VBQ 或 EBQ 都可作为评估 TLIF 术后发生 cage 沉降的风险指标。

【参考文献】

- [1] Soliman MAR, Aguirre AO, Kuo CC, et al. Vertebral bone quality score independently predicts cage subsidence following transforaminal lumbar interbody fusion [J]. *Spine J*, 2022, 22(12): 2017-2023.
- [2] Chen Q, Ai Y, Huang Y, et al. MRI-based Endplate Bone Quality score independently predicts cage subsidence following transforaminal lumbar interbody fusion [J]. *Spine J*, 2023, 23(11): 1652-1658.
- [3] Yao YC, Chou PH, Lin HH, et al. Risk Factors of Cage Subsidence in Patients Received Minimally Invasive Transforaminal Lumbar Interbody Fusion [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2020, 45(19): E1279-E1285.
- [4] Link TM. Osteoporosis imaging: state of the art and advanced imaging [J]. *Radiology*, 2012, 263(1): 3-17.
- [5] Muraki S, Yamamoto S, Ishibashi H, et al. Impact of degenerative spinal diseases on bone mineral density of the lumbar spine in elderly women [J]. *Osteoporos Int*, 2004, 15(9): 724-728.
- [6] Shuhart CR, Yeap SS, Anderson PA, et al. Executive Summary of the 2019 ISCD Position Development Conference on Monitoring Treatment, DXA Cross-calibration and Least Significant Change, Spinal Cord Injury, Peri-prosthetic and Orthopedic Bone Health, Transgender Medicine, and Pediatrics [J]. *J Clin Densitom*, 2019, 22(4): 453-471.
- [7] Hu YH, Yeh YC, Niu CC, et al. Novel MRI-based vertebral bone quality score as a predictor of cage subsidence following transforaminal lumbar interbody fusion [J]. *Journal of Neurosurgery: Spine*, 2022, 37(5): 654-662.
- [8] Salzmänn SN, Okano I, Jones C, et al. Preoperative MRI-based vertebral bone quality (VBQ) score assessment in patients undergoing lumbar spinal fusion [J]. *Spine J*, 2022, 22(8): 1301-1308.
- [9] Ai Y, Chen Q, Huang Y, et al. MRI-based vertebral bone quality score for predicting cage subsidence by assessing bone mineral density following transforaminal lumbar interbody fusion: a retrospective analysis [J]. *Eur Spine J*, 2023, 32(9): 3167-3175.
- [10] Huang Y, Chen Q, Liu L, et al. Vertebral bone quality score to predict cage subsidence following oblique lumbar interbody fusion [J]. *J Orthop Surg Res*, 2023, 18(1): 258.
- [11] Yang J F, Xing X, Luo L, et al. Mitochondria-ER contact mediated by MFN2-SERCA2 interaction supports CD8(+) T cell metabolic fitness and function in tumors [J]. *Sci Immunol*, 2023, 8(87): 2424.
- [12] Jones C, Okano I, Salzmänn SN, et al. Endplate volumetric bone mineral density is a predictor for cage subsidence following lateral lumbar interbody fusion: a risk factor analysis [J]. *Spine J*, 2021, 21(10): 1729-1737.

- [13] Okano I, Jones C, Salzmann SN, et al. Endplate volumetric bone mineral density measured by quantitative computed tomography as a novel predictive measure of severe cage subsidence after standalone lateral lumbar fusion [J]. *Eur Spine J*, 2020, 29(5): 1131-1140.
- [14] Jones C, Okano I, Arzani A, et al. The predictive value of a novel site-specific MRI-based bone quality assessment, endplate bone quality (EBQ), for severe cage subsidence among patients undergoing standalone lateral lumbar interbody fusion [J]. *Spine J*, 2022, 22(11): 1875-1883.
- [15] Heller GZ, Manuguerra M, Chow R. How to analyze the Visual Analogue Scale: Myths, truths and clinical relevance [J]. *Scand J Pain*, 2016, 13: 67-1375.
- [16] Roland M, Fairbank J. The Roland-Morris Disability Questionnaire and the Oswestry Disability Questionnaire [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2000, 25(24): 3115-3124.
- [17] Meunier P, Aaron J, Edouard C, et al. Osteoporosis and the replacement of cell populations of the marrow by adipose tissue. A quantitative study of 84 iliac bone biopsies [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1971, 80: 147-154.
- [18] Pu X, Wang X, Ran L, et al. Comparison of predictive performance for cage subsidence between CT-based Hounsfield units and MRI-based vertebral bone quality score following oblique lumbar interbody fusion [J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(12): 8637-8644.
- [19] Wang J, Chen Q, Ai Y, et al. Vertebral bone quality score as a novel predictor of proximal junctional kyphosis after thoracic adolescent idiopathic scoliosis surgery [J]. *Eur Spine J*, 2023, 32(11): 3996-4002.
- [20] Bosch De Basea Gomez M, Thierry-Chef I, Harbron R, et al. Risk of hematological malignancies from CT radiation exposure in children, adolescents and young adults [J]. *Nat Med*, 2023, 29(12): 3111-3119.
- [21] Courtois EC, Ohnmeiss DD, Guyer RD. Assessing lumbar vertebral bone quality: a methodological evaluation of CT and MRI as alternatives to traditional DEXA [J]. *Eur Spine J*, 2023, 32(9): 3176-3182.
- [22] Sakai Y, Takenaka S, Matsuo Y, et al. Hounsfield unit of screw trajectory as a predictor of pedicle screw loosening after single level lumbar interbody fusion [J]. *J Orthop Sci*, 2018, 23(5): 734-738.
- [23] Li J, Zhang Z, Xie T, et al. The preoperative Hounsfield unit value at the position of the future screw insertion is a better predictor of screw loosening than other methods [J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(3): 1526-1536.
- [24] Hulme PA, Boyd SK, Ferguson SJ. Regional variation in vertebral bone morphology and its contribution to vertebral fracture strength [J]. *Bone*, 2007, 41(6): 946-957.
- [25] Li J, Xie Y, Sun S, et al. Regional differences in bone mineral density biomechanically induce a higher risk of adjacent vertebral fracture after percutaneous vertebroplasty: a case-comparative study [J]. *Int J Surg*, 2023, 109(3): 352-363.
- [26] Zhou J, Yuan C, Liu C, et al. Hounsfield unit value on CT as a predictor of cage subsidence following stand-alone oblique lumbar interbody fusion for the treatment of degenerative lumbar diseases [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2021, 22(1): 960.
- [27] Marchi L, Abdala N, Oliveira L, et al. Radiographic and clinical evaluation of cage subsidence after stand-alone lateral interbody fusion [J]. *J Neurosurg Spine*, 2013, 19(1): 110-118.
- [28] Ai Y, Zhu C, Chen Q, et al. Comparison of predictive value for cage subsidence between MRI-based endplate bone quality and vertebral bone quality scores following transforaminal lumbar interbody fusion: a retrospective propensity-matched study [J]. *The Spine Journal*, 2024: 1-10.

(收稿日期:2024-04-02;修回日期:2024-04-10)

(本文编辑:彭羽)