

腰椎椎间融合影像学评价方法的研究进展

任博文^{1,2}, 韩振川^{1,3}, 吴剑慧⁴, 刘建恒², 刘庆祖^{1,2}, 毛克亚²

¹解放军医学院, 北京 100853; ²解放军总医院第四医学中心 骨科医学部, 北京 100853; ³火箭军特色医学中心 骨科, 北京 100032; ⁴首都医科大学附属北京潞河医院 肿瘤科, 北京 101149

摘要: 腰椎融合手术目前已广泛应用于各类腰椎退行性疾病的治疗, 并取得了令人满意的效果。是否实现腰椎椎间融合是评估手术远期疗效的关键指标, 因此对腰椎椎间融合的正确评估至关重要。通过影像学检查观察腰椎椎间融合情况是评价腰椎融合常用手段, 在术后椎间融合效果评价中发挥着不可或缺的作用。本文旨在汇总目前评估腰椎椎间融合的影像学方法, 评价不同影像学方法的优缺点和适用情况, 为临床选取合适的影像学方法评价腰椎椎间融合情况提供理论证据。

关键词: 腰椎融合术; 融合率; 假关节; 影像学评价; 融合标准

中图分类号: R687.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-5227(2022)08-0901-06 DOI: 10.3969/j.issn.2095-5227.2022.08.016

网络出版时间: 2022-07-18 18:31 网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1117.R.20220715.1512.009.html>

引用本文: 任博文, 韩振川, 吴剑慧, 等. 腰椎椎间融合影像学评价方法的研究进展 [J]. 解放军医学院学报, 2022, 43 (8): 901-906.

Research advances in radiographic evaluation methods for lumbar intervertebral fusion

REN Bowen^{1,2}, HAN Zhenchuan^{1,3}, WU Jianhui⁴, LIU Jianheng², LIU Qingzu^{1,2}, MAO Keya²

¹ Chinese PLA Medical School, Beijing 100853, China; ² Department of Orthopedics, the Fourth Medical Center, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China; ³ Department of Orthopedics, PLA Rocket Force Characteristic Medical Center, Beijing 100032, China; ⁴ Department of Oncology, Beijing LuHe Hospital, Capital Medical University, Beijing 101149, China

Corresponding author: MAO Keya. Email: maokeya@sina.com

Abstract: Lumbar fusion surgery is now widely used in the treatment of all types of lumbar degenerative diseases and has achieved satisfactory results. The lumbar interbody fusion rate is a key indicator for assessing the long-term efficacy of the procedure, therefore a proper assessment of lumbar interbody fusion is essential. Observation of lumbar interbody fusion by radiographic examination is a common tool for evaluating lumbar fusion and plays an integral role in the evaluation of postoperative interbody fusion outcomes. The purpose of this review is to summarize the current radiographic methods for assessing lumbar interbody fusion, evaluate the advantages and disadvantages, and applicability of different radiographic methods, so as to provide theoretical evidence for the selection of appropriate radiographic methods for clinical evaluation of lumbar interbody fusion.

Keywords: lumbar interbody fusion; fusion rate; pseudarthrosis; radiographic assessment; fusion criteria

Cited as: Ren BW, Han ZHCH, Wu JH, et al. Research advances in radiographic evaluation methods for lumbar intervertebral fusion [J]. Acad J Chin PLA Med Sch, 2022, 43 (8): 901-906.

随着科学技术的发展, 椎间融合技术不断完善, 腰椎椎间植骨融合术目前已是最为常见的脊柱外科手术, 广泛应用于治疗腰椎间盘突出症、腰椎滑脱症、腰椎管狭窄症等各类退行性疾病^[1-2]。尽管这项技术取得了令人满意的疗效, 但仍会出现假关节形成、内固定失败、融合器下沉

等融合失败相关并发症, 正确评估术后腰椎椎间融合情况对判断预后尤为重要^[3-4]。最早, 脊柱外科医生通过手术暴露明确腰椎椎间实质性的融合, 受限于其创伤性较大, 该方式很快被弃用。非侵入性影像学检查具有方便、快捷、无创等优点, 逐渐应用于评价腰椎术后融合情况^[5]。融合率是评价腰椎融合预后时常用的指标, 目前文献中对腰椎椎间融合的定义并不一致, 对术后融合情况的判断一直是临床的难题。此外, 评价融合的方法众多, 在评价指标、测量方法、临床应用效果等方面存在较大差异, 在临床上尚无判断骨性融合的广泛共识^[6-8]。因此, 本文将对文献中报道较多的影像学评价方法进行综述, 总结各评价方法的优劣和适用情况, 为脊柱外科医生选取合理、正确的评价方式提供理论证据。

收稿日期: 2022-02-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51772328); 首发科研专项项目 (首发 2018-4-5014); 军队医学科技青年培育计划孵化项目 (19QNP052) Supported by the National Nature Science Foundation of China (51772328); Scientific Research Project of Capital Health Development (2018-4-5014); Project of Military Medical Youth in PLA General Hospital (19QNP052)

作者简介: 任博文, 男, 硕士。研究方向: 脊柱外科及生物材料。Email: docrenbowen@163.com

通信作者: 毛克亚, 男, 博士, 主任医师, 博士生导师。Email: maokeya@sina.com

1 X线

X线检查是脊柱外科影像学检查中最常用、最简便易行的方法。由于骨组织是体内X线衰减系数最大、密度最高的组织,与其他组织之间存在良好的对比,并且X线检查具有成本相对较低、对设备要求不高、方便快捷的特点,因此X线检查常是腰椎术后影像学检查的首选。X线片可以分为立位平片和动力位平片两类,腰椎正侧位(立位平片)和腰椎过屈过伸位(动力位平片)是目前临床判断腰椎融合最常用的影像学方法^[9-10]。

1.1 立位平片 腰椎正侧位X线片可以显示腰椎融合术后相邻椎体之间有无连续的骨桥、椎间融合器、内固定的位置和状态以及椎间隙高度变化。最初,腰椎正侧位片评估椎间融合的标准依据患者疼痛水平、职业状态、活动水平和药物使用情况,将术后效果分为大致分为优秀、良好、一般和差4个等级^[11-12]。随后,融合器周围透明度被纳入衡量融合情况的依据,融合器边缘存在透明带提示椎间存在骨不连。BS融合标准(Brantigan and Steffee Criteria)对先前的标准进行了归纳总结,将融合情况分为5个等级,4级提示椎间部分融合,5级提示椎间达到坚固融合^[13-14]。而腰椎融合放射学评分分级(the radiographic score classification)将术后融合情况分为3个等级,评分达到2级才提示融合牢固^[15]。此外,融合器周围缺乏透明度并不一定意味着融合成功。BSF融合标准(Brantigan, Steffee, Fraser Classification)首次引入了“锁定性假关节”的描述^[16]。“锁定性假关节”的特征之一为融合器边缘与上下终板连接处透光度降低,而融合器中部仍存在透明环,随着时

间的推移可能发展为骨不连。综合目前评价融合的各类标准(表1),多数研究认为坚固融合应在融合器前、后、侧方或融合器之间有连续性骨桥连接上下终板(哨兵征),同时不存在终板与移植骨或融合器之间的空隙,而融合界面出现移植骨周围硬化、移植骨下沉,孤立的哨兵征等则是融合延迟或失败的征象^[17-18]。但腰椎正侧位片受限于成像能力不足,仅能提供正侧两个平面的图像,无法检测出假关节中的微小间隙的松动。此外,腰椎正侧位片评价标准大多为定性的主观判断,与阅片者的经验也有很大关系,存在一定误差。因此,单纯依靠腰椎正侧位X线片无法判断椎间是否存在假关节形成,易误认为椎间融合牢固,致使椎间融合的发生率被高估。

1.2 动力位平片 腰椎过屈过伸位片可以显示脊柱在最大程度弯曲和伸展时的排列状态,量化两个椎体之间的相对运动从而判断术后融合情况。腰椎过屈过伸位片评价融合的量度包括融合椎体间的位移和成角,成角角度测量方法有Cobb法、Hutter法和Simmon法,以Hutter法应用最广^[19]。Hutter法是将屈位和伸位的腰椎X线片重叠,根据成角变化来判定融合与否。Simmon法需要测量经融合节段上下椎体前缘的两条直线的成角,根据成角变化来判断融合情况。Cobb法则需要经融合椎间隙上下终板分别作垂线,根据两垂线成角变化来判断。由于腰椎过屈过伸位片具有可量化的衡量指标,因此是目前临床上评价椎间融合状态最常用的方法。但众多研究者对于判断牢固融合的成角和位移的标准仍存在分歧^[20],美国食品药品监督管理局认为在屈伸位平片上椎间成角活

表1 三种常用的腰椎融合评价标准

Tab. 1 Three commonly used evaluation criteria for lumbar fusion

融合标准	等级	表现
BS融合标准 ^[13-14]	1	存在明显的假关节,结构塌陷、椎间盘高度丧失、椎体滑脱、螺钉断裂、融合器移位或植入骨吸收等
	2	可能存在假关节,显著的植入骨吸收或融合区可见的明显透亮(植入骨或融合器周围2 mm或以上)的区域
	3	融合区域融合状态不确定,融合区植入骨密度与手术即刻骨密度大致相同,至少有一半的植骨区域没有透亮,融合区可见小的透亮区或裂隙
	4	可能存在融合,植骨融合区存在骨桥,骨密度至少达到术后即刻骨密度,植入骨与椎体骨之间不存在透亮区
	5	存在完全融合,植骨融合区的骨密度均高于手术前的骨密度,最理想的情况是植入骨与椎体骨边缘无缝隙;植入骨与椎体骨之间的硬化线也表示融合。实质性融合的其他征象包括成熟的骨小梁骨桥、前路椎体骨的吸收、椎间盘间隙内植入骨的前移、小关节融合、CT上显示的“环状”表现
融合放射学评分分级 ^[15]	0	假关节
	1	固定良好的椎间融合器有骨桥长入,但融合块内放射不连续
BSF融合标准 ^[16]	2	关节融合存在牢固的骨桥
	1	假关节:结构塌陷、椎间盘高度丢失、椎体滑移、螺钉断裂、融合器移位、融合骨明显吸收、融合器或融合骨周围可见透亮带
	2	锁定假关节:椎间中央区域可见透亮带,上下终板间均有实体融合骨长入
	3	放射学融合:融合区域至少有一半存在骨桥接且达到术时即刻的骨密度。融合器周围至少有一侧(融合区的一半)存在融合的骨桥即为坚固融合

动 $\leq 5^\circ$ ，椎体平移 $\leq 3\text{ mm}$ 视为融合，然而有研究认为椎体成角 $< 3^\circ$ 才能视为融合， $> 7^\circ$ 为不融合， $3^\circ \sim 7^\circ$ 时则需要其他方法判断。直到现在，椎体运动的程度与坚固融合的关系仍没有明确的规定。在实际临床应用中，融合的标准通常采取主观判断结合客观量化测量指标进行综合评价，提高了融合结果的可靠性。如 Burkus 分级认为在术后至少间隔 6 个月腰椎正侧位 X 线片显示融合器周围超过 50% 的部分不透光，并且在腰椎动力位平片上椎体平移 $\leq 3\text{ mm}$ ，成角活动 $< 5^\circ$ ，才能确定是完全融合^[21]。然而，腰椎动力位平片不但受限于 X 线成像质量的影响，还受测量方法、衡量标准不一致、观察者经验等因素的影响。此外，椎体临近肌肉的保护、髋关节屈曲和融合器提供的稳定性会掩盖骨不融合引起的相对运动，造成评估的假阴性。

2 CT

迄今，CT 技术被认为是判断椎间骨性融合和诊断内置物并发症（融合器移位、椎弓根螺钉、棒断裂）的影像学“金标准”^[22]。CT 对骨组织具有良好分辨率，能清楚显示融合椎间骨性结构的变化及是否有桥接骨骨小梁形成。多平面重建技术使 CT 对椎间融合界面的显示更为清楚，还可三维、高清晰度地显示椎间融合中的各个层面和融合器内的骨小梁^[23-24]。腰椎矢状位和冠状位 CT 重建图像显示连续骨小梁连接相邻椎体，提示达到骨性融合。有文献报道根据术后时间长短，植骨部位会发生不同程度的骨桥接。无论是椎体间植骨还是后外侧植骨，术后 6 个月在 CT 上应该可以看到骨小梁桥接，术后 1 年椎间隙和后外侧植骨部位应出现成熟的骨小梁和坚固的骨皮质桥接^[25]。但大多数外科医生较少或根本不考虑拍摄术后腰椎 CT，除非临床怀疑假关节，仅使用 X 线片来判断植骨融合情况。一般认为植骨和椎体边缘交界处存在横跨融合节段的骨小梁，并且缺乏骨性透光性是融合的象征，而融合器下沉、终板上囊性改

变和融合器周围的透明光环是骨不连的重要标志^[26]。自行开发和未经验证的融合分级层出不穷并且对融合的描述较为模糊，这些融合分级的可信度较低，在不同观察者之间存在较大误差，导致术后融合率在 70%~100% 这个较大的范围内^[27-29]。有研究将先前概述的融合评估参数进行了汇总，提出了一套更为详尽的融合分级标准，以降低观察者之间的判断误差^[30]，在临床工作中应用较广，见表 2。此外，腰椎 CT 反映患者静态时的脊柱排列和状态，因此立位平片的定性融合标准在 CT 中同样适用，如 Brantigan 标准、Steffee 标准和 BSF 法。尽管 CT 在显示椎间具体细节上具有得天独厚的优势，但仍需要观察者主观判断椎间是否融合，易受观察者的经验影响，从而犯 I 类和 II 类错误。因此，有研究引入了评估融合的定量指标—椎间隙骨体积，通过 CT 层切计算融合节段椎间的骨体积，发现融合术后 2~5 年内骨体积与时间成正比。但遗憾的是，该文献并未阐述骨体积增加与骨融合强度的潜在关系，未提出与骨体积相关的融合标准^[31]。Okano 等^[32]提出利用定量 CT 测量出终板部位骨密度体积 (endplate volumetric bone mineral density, EvBMD) 来评估融合器下沉的风险，组间相关系数为 0.95，EvBMD 可作为可重复测量的定量指标用于评估椎间融合情况。近年来，还有研究报道了融合术后 1 年椎间上终板的有效融合面积是一种潜在定量评价指标，可有效判断椎间融合情况，但同样缺乏具体的评价标准^[33]。目前基于 CT 评价融合的标准仍缺乏准确可行的定量指标，未来需引入更多可靠的指标以判断椎间融合状态。相较于平片，CT 的检查费用更高，此外其带来的辐射同样不可忽视。研究表明拍摄一次腰椎 CT 的平均放射量 (6 mSv) 相当于约 300 次胸部 X 线检查的放射量 (0.02 mSv)^[34]。不可否认，CT 扫描目前仍是评估腰椎椎间融合的“金标准”，但需要综合考虑其优势和潜在风险后再进行选择。

表 2 临床常用的腰椎融合的 CT 评价标准^[30]

Tab. 2 Criteria for interbody fusion assessment on computer tomography commonly used in clinic

等级	表现
1	完全融合: 椎体上下终板间清晰可见连续骨小梁生长, 有骨性重塑的证据(100%), 融合器周围或内部有连续骨桥形成; 融合器与终板连接处缺乏透明度; 融合器或椎体无可见骨折或损伤; 相邻终板内无囊泡状改变; 椎间新骨无线状骨折; 融合器内部或周围无新生骨再形成, 融合器无下沉或移位
2	坚固融合: 超过75%的融合区域存在骨桥和骨小梁; 椎间隙有骨小梁穿过; 排除了任何明显不融合的象征
3	疑似未融合: 椎间隙仅有部分骨桥; 融合器与终板交界处仅有一侧存在牢固的连接
4	未融合: 完全或连续裂隙形成; 裂隙边缘硬化; 真空现象; 椎间骨桥不连续; 融合器边缘存在透明带; 椎体或融合器可见骨折; 临近终板内出现囊性变; 椎间隙新生骨或融合器周围存在线形缺损(骨折); 椎体下沉或移位; 融合器周围或内部无连续骨桥形成

3 磁共振

磁共振 (magnetic resonance imaging, MRI) 评估腰椎融合状态的准确性远不如 CT, 但在评估软组织和椎管内容物方面准确性优于 CT。由于金属置入物容易在图像产生伪影, 并且骨组织在 MRI 上的分辨率不高, 因此一般不用于评价术后融合^[35]。大多数情况下, MRI 用于判断腰椎术后融合节段的临近节段是否存在新发的狭窄或椎间盘突出, 对腰椎骨性融合状态只能粗略评估。通过调整 MRI 的参数, 如扩大采样带宽、采用压脂序列或多序列成像, 可以最大程度地减少术后脊柱 MRI 的伪影^[22]。在 T2 加权像上, 相邻融合椎体软骨质下骨髓的低信号改变和在 T1 加权像的高信号改变可以提示融合。相反, T2 加权图像上的高信号强度变化和 T1 加权图像上的低信号强度变化则提示骨不连。总的来说, MRI 并非腰椎融合评估的常规检查。

4 骨单光子发射计算机断层显像

骨单光子发射计算机断层显像 (bone single-photon emission computed tomography/computed tomography, Bone-SPECT/CT) 通过提供腰椎融合区域成骨组织代谢活动的强度, 协助诊断术后假关节形成, 对术后腰椎融合状态的评价具有一定临床价值^[36]。一般而言, 术后腰椎椎间存在假关节时将出现局部浓聚现象, 融合区域的生物活性和血液供应增加导致更多的放射性标志物在融合区域被吸收^[37-38]。然而, 在术后 1 年内骨扫描结果很难判断腰椎椎间是否存在假关节形成, 因为假关节在短期内并不会出现吸收浓聚的现象, 只有腰椎术后满 1 年融合区域出现摄取增加才提示可能存在假关节形成。因此, 骨显像技术在评价术后融合方面具有一定局限性, 临床上应用较少。

5 立体摄影测量分析法

立体摄影测量分析法 (roentgen stereophotogrammetric analysis, RSA) 提供脊柱运动的三维成像, 有助于判断脊柱融合情况^[39]。该技术将金属置入物放置在目标区域, 通过动态 X 线和计算机辅助运动跟踪金属置入物运动轨迹从而精确测量椎体平移和旋转活动。RSA 可以检测出椎间的细微运动, 当旋转和平移运动的测量误差要求分别低于 1°和 1 mm 时, RSA 是最佳选择, 可有效判断椎间稳定性。RSA 技术属于有创操作且应用程序要求严格, 操作疏忽会导致严重误差, 限制了其广泛应用。尽管这种方法的准确性很高, 并且在脊柱融合评估中具有巨大潜力, 但大多用于学

术研究, 而非临床工作。

6 影像学评估方法的评价

目前对腰椎融合缺乏统一的定义, 不同腰椎影像学评估方法直接影响对腰椎融合情况的判断结果。腰椎 X 线, 无论是短期或长期随访结果, 始终显示较低的融合率^[40]。腰椎动力位片评价腰椎融合指标临界值不统一, 常导致评估的融合结果不一致。最近, 一篇纳入了 15 项临床研究的 Meta 分析对比各种影像学方法诊断融合术后假关节的准确性^[37]。他们发现在使用 X 线、CT、骨显像技术评价腰椎融合的过程中, CT 诊断腰椎融合的效应值最高, 认为 CT 是腰椎融合术后假关节最准确的无创性影像学检查方法。Kroeze 等^[41]对 3 种放射学脊柱融合评价标准 (BS 标准, Burkus 分级, RS 分级) 的可靠性进行了检测, 研究要求 4 名医生使用上述评分系统对 50 名融合术后患者逐一打分。结果发现 Burkus 分级在 4 名观察者中的一致性最高 ($k=0.56, 0.68 \sim 0.85$), BS 标准和 RS 分级仅显示较好的一致性, k 值分别为 0.38 和 0.39。目前众多临床研究高估了术后融合率, 更加详尽的主、客观相结合的评价标准可以降低各融合率之间的异质性, 增加其可靠性^[42]。有趣的是, 骨科医生与放射科医生评价腰椎融合的结果存在显著差异, 但尚无临床研究报道对这一差异做出解释^[40]。理想的融合分级系统应易于解释和理解才能更好地应用于临床, 而复杂分级系统不但限制其应用还会加剧评估之间的误差。因此, 未来需引入更多客观测量指标将融合等级量化, 方便进一步评估。尽管各种融合评价系统层出不穷, 但目前仍没有一致的标准分级系统, 未来需要更多的临床研究对不同融合分级系统的准确性进行检验, 总结出更为精确可靠的椎间融合评价方法。

7 结语

综上所述, 影像学评价方法是评估腰椎融合术后融合情况的主要方式。没有任何一种单一的影像学评价方式能够完全精确地判断椎间融合情况, 均有其优势与弊端, 因此正确选取合适的影像学评价方法对于脊柱外科医生至关重要。X 线检查具有便宜快捷的优势, 立位平片可以对腰椎融合情况进行初步的判断, 但准确性较差, 无法明确椎间融合的具体情况, 而动力位平片在判断脊柱稳定性方面具有绝对优势, 但存在测量误差和判断标准不一的缺点。CT 仍是目前判断腰椎椎间融合情况的“金标准”, 评价结果更加准确客观。

CT 和三维重建提供了更多椎间融合器周围骨的具体细节,多角度显示椎间的各个层面,大大提升了假关节的检出率。目前 CT 判断标准大多仍是主观的定性指标,缺乏定量指标判断的标准,未来需要更多定量指标协助预测假关节的诊断。骨扫描和 MRI 在评价椎间融合方面虽有应用,但效果有限,不推荐常规用于判断融合情况。RSA 在判断融合情况方面具有巨大潜能,精确度高,但操作复杂,对测量要求严格,临床不建议使用。综上,我们推测采取动力位平片结合 CT 三维重建作为一种互补的影像学评价方法,将会显著提高术后椎间不融合的诊断率,后期需要更多临床研究进行验证。

参考文献

- 1 贺海烽,毛克亚,李鹏,等.一次性可扩张通道辅助下 MIS-TLIF 与 PLIF 治疗单节段腰椎退行性疾病的疗效比较 [J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2020, 35 (7): 686-689.
- 2 钟睿,王润生,刘建恒,等.不同入路微创经椎间孔腰椎间融合术治疗单节段腰椎管狭窄症的疗效比较 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2019, 33 (7): 807-813.
- 3 Bassani R, Morselli C, Querenghi AM, et al. Functional and radiological outcome of anterior retroperitoneal versus posterior transforaminal interbody fusion in the management of single-level lumbar degenerative disease [J]. *Neurosurg Focus*, 2020, 49 (3): E2.
- 4 Miscusi M, Trungu S, Ricciardi L, et al. The anterior-to-psyos approach for interbody fusion at the L5-S1 segment: clinical and radiological outcomes [J]. *Neurosurg Focus*, 2020, 49 (3): E14.
- 5 Ghodasara N, Yi PH, Clark K, et al. Postoperative spinal CT: what the radiologist needs to know [J]. *Radiographics*, 2019, 39 (6): 1840-1861.
- 6 Kitchen D, Rao PJ, Zotti M, et al. Fusion assessment by MRI in comparison with CT in anterior lumbar interbody fusion: a prospective study [J]. *Global Spine J*, 2018, 8 (6): 586-592.
- 7 Mankanji H, Schoenfeld AJ, Bhalla A, et al. Critical analysis of trends in lumbar fusion for degenerative disorders revisited: influence of technique on fusion rate and clinical outcomes [J]. *Eur Spine J*, 2018, 27 (8): 1868-1876.
- 8 Lehr AM, Oner FC, Delawi D, et al. Efficacy of a standalone microporous ceramic versus autograft in instrumented posterolateral spinal fusion: a multicenter, randomized, inpatient controlled, noninferiority trial [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2020, 45 (14): 944-951.
- 9 Lin WB, Ha A, Boddapati V, et al. Diagnosing pseudoarthrosis after anterior cervical discectomy and fusion [J]. *Neurospine*, 2018, 15 (3): 194-205.
- 10 Balsano M, Spina M, Segalla S, et al. Efficacy and safety of minimally invasive axial presacral L5-S1 interbody fusion in the treatment of lumbosacral spine pathology: a retrospective clinical and radiographic analysis [J]. *Acta Biomed*, 2020, 91 (14-S): e2020035.
- 11 Benzakour A, Benzakour T. Lumbar disc herniation: long-term outcomes after mini-open discectomy [J]. *Int Orthop*, 2020, 44 (2): 409.
- 12 Li X, Bai JZ, Hong Y, et al. Minimum seven-year follow-up outcomes of percutaneous endoscopic lumbar discectomy for lumbar degenerative disease [J]. *Int J Gen Med*, 2021, 14: 779-785.
- 13 Brantigan JW, Steffee AD. Carbon fiber implant to aid interbody lumbar fusion: 1-year clinical results in the first 26 patients [M]. // *Lumbar Fusion and Stabilization*. Tokyo: Springer Japan, 1993: 379-395.
- 14 Jiang C, Yin S, Wei JM, et al. Full-endoscopic posterior lumbar interbody fusion with epidural anesthesia: technical note and initial clinical experience with one-year follow-up [J]. *J Pain Res*, 2021, 14: 3815-3826.
- 15 Kroeze RJ, Verberne SJ, Graat H, et al. Mid-term and long-term clinical and radiological outcomes of a carbon I/F stand-alone cage in anterior lumbar interbody fusion [J]. *Int J Spine Surg*, 2020, 14 (5): 665-670.
- 16 Li YM, Huang Z, Towner J, et al. Laterally placed expandable interbody spacers with and without adjustable lordosis improve radiographic and clinical outcomes: a two-year follow-up study [J]. *Cureus*, 2021, 13 (12): e20302.
- 17 Fukushima M, Oshima Y, Yuzawa Y, et al. Clinical and radiographic analysis of unilateral versus bilateral instrumented one-level lateral lumbar interbody fusion [J]. *Sci Rep*, 2020, 10 (1): 3105.
- 18 Proietti L, Perna A, Ricciardi L, et al. Radiological evaluation of fusion patterns after lateral lumbar interbody fusion: institutional case series [J]. *Radiol Med*, 2021, 126 (2): 250-257.
- 19 Ferrara L, Ford W, Nunley PD, et al. Critical evaluation of biomechanical principles and radiographic indicators for fusion assessment in a novel conformable porous mesh implant [J]. *Int J Spine Surg*, 2020, 14 (s3): S108-S114.
- 20 Tanaka M, Kanayama M, Hashimoto T, et al. Clinical outcomes and postoperative radiographic assessment of osteoplastic hemilaminectomy in the treatment of lumbar foraminal nerve root compression [J]. *Spine Surg Relat Res*, 2021, 5 (6): 352-358.
- 21 Wu SS, Lin B, Li X, et al. Single-stage debridement via autogenous iliac bone graft through the OLIF corridor and lateral fixation in treating spontaneous single-level lumbar pyogenic spondylodiscitis [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2021, 22 (1): 947.
- 22 Battleday FM, Williams M, Rankine J, et al. MRI versus CT: a retrospective investigation of the feasibility and agreeability in post-operative evaluation of screw position after posterior lumbar interbody fusion [J]. *Eur Spine J*, 2021, 30 (1): 173-180.
- 23 Corona-Cedillo R, Saavedra-Navarrete MT, Espinoza-Garcia JJ, et al. Imaging assessment of the postoperative spine: an updated pictorial review of selected complications [J/OL]. <https://doi.org/10.1155/2021/9940001>.
- 24 Patel A, Haleem S, Rajakulasingam R, et al. Comparison between conventional CT and grayscale inversion CT images in the assessment of the post-operative spinal orthopaedic implants [J]. *J Clin Orthop Trauma*, 2021, 21: 101567.
- 25 Ortiz AO, de Moura A, Johnson BA. Postsurgical spine: techniques, expected imaging findings, and complications [J]. *Semin Ultrasound CT MR*, 2018, 39 (6): 630-650.
- 26 Yu YH, Robinson DL, Ackland DC, et al. Influence of the geometric and material properties of lumbar endplate on lumbar interbody fusion failure: a systematic review [J]. *J Orthop Surg Res*, 2022, 17 (1): 224.
- 27 Schnake KJ, Fleiter N, Hoffmann C, et al. PLIF surgery with titanium-coated PEEK or uncoated PEEK cages: a prospective randomised clinical and radiological study [J]. *Eur Spine J*,

- 2021, 30 (1) : 114-121.
- 28 Lehr AM, Oner FC, Delawi D, et al. Increasing fusion rate between 1 and 2 years after instrumented posterolateral spinal fusion and the role of bone grafting [J]. *Spine*, 2020, 45 (20) : 1403-1410.
- 29 陈斌彬, 毛克亚, 韩振川, 等. 微创经椎间孔腰椎植骨融合术与开放后路腰椎植骨融合术治疗腰椎滑脱症的疗效比较 [J]. *解放军医学院学报*, 2019, 40 (2) : 101-105.
- 30 Xi X, Zeng ZL, Li FP, et al. Caudal insertion of pedicle screws facilitates interbody distraction during spondylolisthetic vertebrae restoration: a retrospective study [J]. *Pain Ther*, 2021, 10 (2) : 1537-1550.
- 31 Lee JH, Kim SK, Kang SS, et al. A long-term follow-up, multicenter, comparative study of the radiologic, and clinical results between a CaO-SiO₂-P₂O₅-B₂O₃ bioactive glass ceramics (BGS-7) intervertebral spacer and titanium cage in 1-level posterior lumbar interbody fusion [J]. *Clin Spine Surg*, 2020, 33 (7) : E322-E329.
- 32 Okano I, Jones C, Salzman 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.
- 33 梅凌, 倪涛, 董晓俊, 等. 腰椎退行性疾病患者行内固定配合椎间植骨融合术后CT影像学效果评价 [J]. *中国CT和MRI杂志*, 2021, 19 (4) : 144-146.
- 34 Zak L, Tiefenboeck TM, Wozasek GE. Computed tomography in limb salvage and deformity correction-3D assessment, indications, radiation exposure, and safety considerations [J]. *J Clin Med*, 2021, 10 (17) : 3781.
- 35 How NE, Street JT, Dvorak MF, et al. Pseudarthrosis in adult and pediatric spinal deformity surgery: a systematic review of the literature and meta-analysis of incidence, characteristics, and risk factors [J]. *Neurosurg Rev*, 2019, 42 (2) : 319-336.
- 36 Al-Riyami K, Vöö S, Gnanasegaran G, et al. The role of bone SPECT/CT in patients with persistent or recurrent lumbar pain following lumbar spine stabilization surgery [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2019, 46 (4) : 989-998.
- 37 Peters MJM, Bastiaenen CHG, Brans BT, et al. The diagnostic accuracy of imaging modalities to detect pseudarthrosis after spinal fusion-a systematic review and meta-analysis of the literature [J]. *Skeletal Radiol*, 2019, 48 (10) : 1499-1510.
- 38 Israel O, Pellet O, Biassoni L, et al. Two decades of SPECT/CT - the coming of age of a technology: an updated review of literature evidence [J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2019, 46 (10) : 1990-2012.
- 39 Parashin S, Gascoyne T, Zarrabian M. A phantom and cadaveric study of radiostereometric analysis in posterior cervical and lumbar spinal fusion [J]. *Spine J*, 2020, 20 (8) : 1333-1343.
- 40 Noordhoek I, Koning MT, Vleggeert-Lankamp CLA. Evaluation of bony fusion after anterior cervical discectomy: a systematic literature review [J]. *Eur Spine J*, 2019, 28 (2) : 386-399.
- 41 Kroeze RJ, Graat HCA, Pluymakers WJ, et al. Interobserver and intraobserver reliability in the radiologic assessment of lumbar interbody fusion [J]. *Clin Spine Surg*, 2017, 30 (6) : E853-E856.
- 42 Debnam JM, Chi TL, Ketonen L, et al. Superiority of multidetector computed tomography with 3-dimensional volume rendering over plain radiography in the assessment of spinal surgical instrumentation complications in patients with cancer [J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2019, 43 (1) : 76-84.