

对脊柱椎间融合的影像学评价策略

高志强¹, 李洋², 罗飞² (1重庆通信学院门诊部, 重庆市 400035; 2重庆市西南医院骨科, 重庆市 400038)

文章亮点:

- 1 此问题的已知信息: 影像学是评价脊柱椎间融合的重要手段。其中临床上最为常用的方法是 X 射线片和 CT。
- 2 文章增加的新信息: X 射线片、CT、核磁共振成像等多种影像学方法均能直接或间接对脊柱融合做出判断, 但因核磁共振成像、光子发射计算机断层成像、超声等方法因目前技术限制, 其特异性、敏感性等指标尚不能满足临床需求, 仍处于科研阶段。基于 X 射线片、CT 检查的融合判断方法较多, 尚无统一指标。判断结果受不同评价体系影响。但整体而言, CT 被认为是脊柱融合判断的影像学“金标准”。
- 3 临床应用的意义: 全面了解各种脊椎融合影像学方法的优、缺点, 能够更有效的帮助医生对患者脊柱椎间融合情况进行判断, 有效减少融合失败并发症的出现。

关键词:

骨科植入物; 脊柱植入物; 脊柱融合; 椎间融合; 颈椎融合; 腰椎融合; 评价方法

主题词:

脊柱融合术; 颈椎; 腰椎; 磁共振成像; 组织工程

基金资助:

解放军第三军医大学第一附属医院临床医学创新基金(SWH2013LC23), 课题名称: 同种异体骨腰椎椎间融合器治疗融合失败高危患者的临床对照研究

摘要

背景: 椎间融合是脊柱外科常用的修复方式, 融合失败会导致多种并发症。对融合的正确判断非常重要。目前临床常使用影像学方法对融合情况进行判断。在评价融合时, X 射线片、CT、MRI 等检查手段拥有各自特殊的方法、特点, 从而导致了其在敏感性、特异性等方面存在诸多差异。

目的: 综述影像学检查手段在脊柱椎间融合评价中的研究进展。

方法: 以英文关键词“lambar fusion, cervical fusion, interbody fusion, evaluation method”为检索词, 在 PubMed 数据库中进行检索。筛选出对椎间融合方法进行详细描述文献进行综述, 包含影像学手段的多种评价方法的对比研究。

结果与结论: 依据纳入标准及排除标准, 共入选 40 篇文献进行综述。X 射线片和 CT 是使用最为广泛的判定手段, CT 的判断结果更加可靠。MRI、骨扫描等其他影像学检查无法准确、直接的对脊柱融合情况进行评价。综合判断症状、体征和各种影像资料是更为合理的脊柱椎间融合评价策略。

高志强, 李洋, 罗飞. 对脊柱椎间融合的影像学评价策略[J]. 中国组织工程研究, 2015, 19(48):7825-7830.

doi:10.3969/j.issn.2095-4344.2015.48.020

Imaging evaluation strategy of spinal interbody fusion

Gao Zhi-qiang¹, Li Yang², Luo Fei² (1Outpatient Department, Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China; 2Department of Orthopedics, Chongqing Southwest Hospital, Chongqing 400038, China)

Abstract

BACKGROUND: Interbody fusion is widely used in spine surgeries. Failed fusion may cause many complications, so it is very important to evaluate fusion before surgery. Imaging methods are commonly used to evaluate fusion, including X ray, CT and MRI. Above methods have their own specific methods and characteristics, which cause their differences in sensibility and specificity.

OBJECTIVE: To review the research progress of imaging methods in interbody fusion.

METHODS: The English key words were “lambar fusion, cervical fusion, interbody fusion, evaluation method” in the PubMed database. The literatures with detailed description of interbody fusion were selected for further review, including comparative study on a variety of evaluation methods of imaging means.

RESULTS AND CONCLUSION: According to the inclusion criteria and exclusion criteria, a total of 40 papers were included. X-ray and CT are the most commonly used methods, while CT is more reliable. MRI, bone scan and other methods cannot correctly and directly evaluate spinal fusion. Overall judgment of symptoms, signs and different kinds of image data are more reasonable fusion evaluation strategies.

Subject headings: Spinal Fusion; Cervical Vertebrae; Lumbar Vertebrae; Magnetic Resonance Imaging; Tissue Engineering

高志强, 男, 1963年生, 河北省安平县人, 汉族, 1989年解放军第三军医大学毕业, 副主任医师, 主要从事脊柱外科的临床研究。

通讯作者: 罗飞, 博士, 副主任医师, 重庆市西南医院骨科, 重庆市 400038

中图分类号:R318

文献标识码:A

文章编号:2095-4344

(2015)48-07825-06

稿件接受: 2015-09-16

http://www.crter.org

Gao Zhi-qiang, Associate chief physician, Outpatient Department, Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China

Corresponding author: Luo Fei, M.D., Associate chief physician, Department of Orthopedics, Chongqing Southwest Hospital, Chongqing 400038, China

Accepted: 2015-09-16

Funding: the Clinical Medical Innovation Foundation of First Affiliated Hospital of Third Military Medical University of Chinese PLA, No. SWH2013LC23

Gao ZQ, Li Y, Luo F. Imaging evaluation strategy of spinal interbody fusion. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2015;19(48):7825-7830.

0 引言 Introduction

脊柱椎间融合是使用最为广泛的治疗脊柱退行性疾病、创伤、肿瘤及畸形的手术方式。其主要并发症包括假关节形成、内固定损坏、椎体移位、沉降导致的神经症状及慢性疼痛等,而导致这些并发症的根本原因就是椎体间未融合或者融合失败。因此,对患者术后椎间融合状态的正确评估就显得尤为重要。自从有学者于1911年首先报道了脊柱融合手术^[1],一百年来,脊柱外科医生使用体格检查、临床表现、影像学,甚至手术暴露等手段来评价融合情况^[2]。诚然,手术暴露始终是评价融合的“金标准”^[3],但综合伦理学准则、社会经济因素、可操作性、患者可接受度等多方面因素,非侵入性的检查方式更便于实施。相较于体格检查、临床表现等方法,影像学检查可以直视融合区成骨情况、内固定状态、神经压迫甚至血液供应,更加直观、可靠。基于影像学检查的融合评价方法被广泛接受。随着成像技术的不断发展,椎间融合的评价已不再局限在普通X射线片这一单一手段,薄层螺旋计算机断层扫描、CT三维重建、MRI、光子发射计算机断层成像、放射立体照相测量分析等技术相继被用于脊柱融合的评价。上述各种影像学技术在成像原理、评价指标、测量方法、医疗花费等多方面存在较大差异。外科医生在临床及科研活动有时难以准确、合理的选取正确、合理的检查手段及评估方法。文章的目的在于通过回顾文献,综合评价多种影像学检查的优劣,试图总结出较为合理的脊柱椎间融合评价策略。

1 资料和方法 Data and methods

1.1 资料来源 在Pubmed数据库进行检索,检索词为“lambar fusion, cervical fusion, interbody fusion, evaluation method”。检索截止时间为2015年4月。

1.2 纳入标准和排除标准

纳入标准: ①对椎间融合评价方法进行详细描述的临床研究。②包含影像学手段的多种评价方法的对比研究。

排除标准: ①重复文献。②对具体评价方法描述不清的文献。③基础研究。

1.3 数据提取和质量评价 依据纳入标准及排除标准,通过阅读摘要,初步筛选出文献168篇。通过阅读全文排除重复、相关性差文献128篇,共纳入40篇文献进行综述。其中文献[4-26]为X射线相关文献,文献[27-34]为CT相关文献,文献[35-37]为其他影像学检查相关文献,文献

[38-40]为以手术暴露为对照的影像学评价文献。

2 结果 Results

2.1 静态平片 静态正侧位平片是脊柱融合术后评价融合与否最常规也是使用时间最长的检查手段。它的优点在于低廉的价格、对影像设备依赖度低,放射剂量小,用较低的代价就能获得非常丰富的信息。从正侧位片中可以看出骨桥(Bone bridge)是否连续、椎间融合器和内固定周围的透光带、Cage是否下沉、内固定的位置和状态、椎体间的相对位移。基于以上信息,许多学者提出了判断融合的标准。其中使用最为广泛的是Brantigan和Steffee的方法(Brantigan and Steffee Method)^[4-5](表1)。他们将脊柱融合分为5级,A、B、C为不融合,D、E为融合。Fraser将Brantigan和Steffee的方法进行了调整,提出了评价假关节的评分(BSF scale)^[6-7](表2)。在正侧位片上,有连续的骨小梁通过上下终板称为“骨桥”,McAfee等^[8]称之为“哨兵征”(sentinel sign),他认为只有出现“哨兵征”才是评价融合成功的标志,这一概念在静态评价融合中十分重要。Christensen等^[9]将融合分为3级:1级为无节段间骨桥形成,2级为可疑骨桥形成,3级为连续的节段间骨桥融合。Shah等^[10]的评价标准虽然不局限于正侧位片,但其基本出发点仍然是“骨桥”。

作为一种性价比极高的检查手段,正侧位片的优势显而易见,但从上述各种评价方法可以看出,这种方法往往只能对融合节段的影像进行定性的、描述性的分类,缺乏更为精确的量化指标,受到评价者的主管判断、影像质量、内置物遮挡等许多因素制约,其评价结果误差较大。

2.2 动力位片 自从1948年Cleveland等^[11]首先使用动力位片评价腰骶椎的融合情况,这一方法已经被广泛应用。其基本原理是通过测量、比较患者侧位过伸、过屈(flexion-extension)时,椎体间位移及角度变化来评价脊柱的稳定性。测量角度变化的方法有以下3种:Simmons法、Cobb法和Hutter法^[12-14]。Simmons法是在椎体上、下缘分别作2个标记并以此作直线,测量相邻椎体动力位片直线间夹角的变化(图1)。Cobb法是以融合节段上顶锥的上终板和下顶锥的下终板分别作直线,测量此二者间所成角度的变化(图2)。Hutter法则是通过将过伸、过屈位片重合,比较角度的变化^[7, 15]。椎体间位置变化可以通过测量椎体前、后缘或棘突矢状位在过伸-过屈时的相对位移得到,后者主要用于评价颈椎融合(图3)。



图1 Simmons 测量法

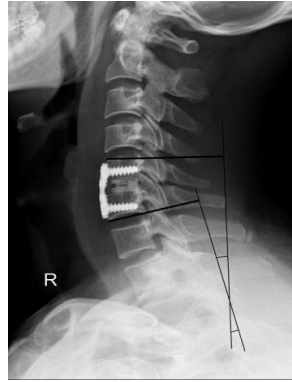


图2 Cobb 测量法

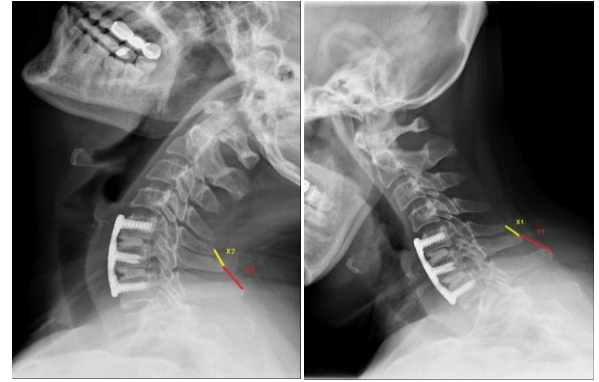


图3 棘突测量方法

表1 Brantigan 和 Steffee 的脊柱融合分级

分级	表现
A 级	因假关节形成导致的明显结构塌陷, 椎间隙高度丢失, 椎体滑移, 断钉, 融合器移位, 植骨吸收
B 级	可能由假关节形成导致的明显植骨吸收, 较大透光带或融合区域(全部植入物边缘 2 mm)可见裂隙
C 级	不确定的骨不连, 融合区域植骨密度与术后即刻相当。至少一半的融合区域可见小的透光带或裂隙
D 级	整个植骨区域可见可能融合的与术后即刻密度相当的骨桥。椎体间无透光带。融合区域的骨质密度大于术后即刻
E 级	即使植入物和椎体间的硬化线提示融合, 但理想状态下, 植入物与椎体无应明显分界。其他融合指征包括融合区域内的骨桥, 前方骨刺的吸收, 和小关节的融合

表2 评价假关节的 BSF 量表

分级	表现
BSF-1	结构塌陷, 椎间隙丢失, 椎体滑移, 断钉, 碳纤维融合器分离, 明显的植骨吸收, 植入物或融合器周围明显的透光带提示影像学假关节形成
BSF-2	上、下终板均有坚强骨桥长入融合器但融合器中间可见透光带提示影像学疑似假关节形成
BSF-3	影像学融合: 融合区域至少一半骨桥与术后即刻密度相当。即使另一边有头冠带, 影像学融合穿过融合器就(一半的融合区域)可以认为已获得坚强融合

表4 Molinari 融合分级系统

分级	融合情况	表现
1	肯定融合	坚强的骨小梁穿过终板和面融合
2	可能融合	一侧融合。另一侧难以看见融合
3	可能没有融合	融合区可疑透光带或缺损
4	没有融合	植骨吸收和内植物疲劳
5		无法评估

目前, 使用动力位片评价脊柱融合的标准尚未统一。在腰椎融合方面, 比较权威的评价方法是2000年美国食品药品监督管理局对脊柱内固定系统临床试验的指导文件, 该指南将腰椎融合定义为: 动力位片上椎体的平移距离小于3 mm^[16], 角度位移小于5°^[17-18]。而在其他的研究中, 则将Cobb角的评价标准设定为1°-7°^[19-20]。虽然椎

表3 Mayer 等的 CT 融合评价指标

分级	融合情况	表现
1 级	完全融合	清晰可见骨小梁连接上下终板, 并有骨性重塑的证据 (100%) 融合器周围有连续的骨桥形成 融合器和终板交界处有牢固的连接 融合器周围没有透光带 融合器或椎体无可见骨折和损坏 临近终板无囊泡样改变 融合器中央或周围的新生骨无线性骨折 融合器无沉降、移位
2 级	坚强融合的指征	骨桥和骨小梁大于融合区域的 75% 局部有骨小梁穿过终板 排除任何不融合的因素
3 级	可能没有坚强融合的指征	终板有局限的骨桥 融合器和终板交界处仅一侧有牢固的连接
4 级	未融合	未融合的确切指征: 生成连续的/完全的裂口 裂隙边缘硬化 真空现象 骨桥不连续 融合器边缘透光带 可见融合器损坏或椎体骨折 终板囊性变 融合器中央或周围新生骨的线性骨折/缺损 融合器下沉、移位 融合器中央或周围无连续的骨桥

表5 改良 Glassman 后外侧融合分级系统

分级	融合情况
1	坚固双侧融合
2	坚固单侧融合
3	部分双侧融合
4	部分单侧融合
5	未融合

体位移也是评价融合的重要指标, 但有研究表明当设定椎体平移距离小于2-5 mm时, 其敏感性低于角度测量^[21-22]。在颈椎融合方面, 通常认为角度变化小于2°是判断融合的标准^[23-24], 而其可靠性却受到质疑^[25-26]。相较于角度变化, Cannada等^[25]认为用棘突相对位移大于2 mm作为判断标准能够获得更高的特异性和敏感性。

虽然使用动力位片评价脊柱融合已经广泛用于临床和科研, 但仍有许多因素会影响其评估结果。首先, 是体位的摆放。在过伸、过屈时, 如何使患者达到最大限度的弯曲(as far as possible^[7])? 对于疼痛症状明显的患者, 很难达到上述要求。部分腰椎融合的患者会在无意中屈曲髋关节, 造成评估的假阴性。而对于脊柱极不稳定的患者, 极限的过伸、过屈可能会造成医源性的神经损伤。其次, 内固定的应用会在很大程度上限制脊柱的活动。最后, 测量方法、测量技术及测量误差都会直接影响评估结果。

2.3 CT 相较于X射线片, 使用CT评估脊柱融合有许多优势。CT可以提供融合区域更为细节的信息, 包括成骨的位置、范围、状态甚至新生骨的体积^[27], 此外, 随着CT设备的更新, CT扫描的层厚已经达到1 mm, 配套软件的发展让CT可以进行二维和三维重建^[28], 以往广受诟病的金属伪影问题也得到了较好解决^[29]。正因如此, CT也被广泛用于融合的评价。CT评价融合最重要的指标是有连续的骨桥通过融合节段的上下终板且在内置物和椎体结合部没有透光带。不融合的判断主要有以下几点: ①融合器的下沉。②终板的囊性改变。③内置物周围的“halo”征(提示内置物松动)^[30]。基于以上几点, Siepe等^[31]在他们的研究中提出了一个十分详尽的CT融合判断标准(表3)。由于患者在静态下进行CT检查, 因此CT的评价标准也部分借鉴或完全使用静态平片的判断方法。例如, 广泛使用的BSF假关节评分就常用于CT对融合的评价^[6, 32]。在Carreon等^[3]的研究中, 分别比较了高分辨率CT和平片对后外侧融合判断的可靠性。他们使用Molinari融合分级系统和改良Glassman后外侧融合分级系统两种评价方案同时进行评估(表4, 5), 结果显示CT的组间及组内一致性要明显高于动力位片和正侧位片^[28]。在既往X射线片评价融合的研究中, 只能使用类似Molinari和Glassman这种定性或半定量的较为主观的判断方法, 而借助强大的数据基础, 高分辨率CT可以对融合节段成骨情况进行定量描述。Ito等^[27]使用螺旋CT(层厚=2 mm)将融合节段内轴向平扫的骨融合区域叠加, 可以计算出融合区内骨的体积比(体积比=骨体积/椎间隙总体积-融合器体积)。其结果显示术后第2-5年, 融合区内骨体积较术后前2年明显增加。

CT检查的缺点在于高昂的检查费用和大剂量的辐射。Biswas等^[33]的研究表明1次颈椎、胸椎、腰椎CT检查的辐射剂量分别相当于55, 225, 240次胸片检查。Fazel等^[34]的研究结果也表明颈、腰椎CT的放射剂量约等于300次正位胸片。另外, 在进行三维重建时, CT主要依据相邻扫描层面的数据, 即使薄层CT也可能得到假阳性的评价结果。

2.4 其他影像学方法 因为易受金属内置物影响和对骨质较低的分辨能力, 在评价融合时, 核磁共振成像并不

作为常规检查。其往往作为辅助手段, 通过对术后复发性的神经压迫和软骨下骨髓的成像对不融合进行大致的评估^[35]。骨扫描可以通过对融合区域的代谢程度对融合进行评价, 但需要注意的是此种方法仅能证明融合区域有较丰富的血供, 但缺乏对成骨状态的直接描述。有研究表明较光子发射计算机断层成像对不融合的敏感性和特异性仅为50%和58%^[36]。有学者尝试使用超声对融合进行评价, 但鉴于其较高的衰减率, 很难对椎体前部进行成像^[37]。

2.5 评估方法的评价 X射线片和CT是当下临床和科研中应用最广泛的两种检查手段。其二者的基本原理和方法即一致又各有特点。关于二者的优劣也一直是争论的热点。就本文文献检索结果而言, 共有4篇以“金标准”(手术暴露)为参照, 对X射线片和CT判断融合进行比较的研究。2008年, Brantigan等^[4]对CT、X射线片在行置入碳纤维Cage的后路腰椎椎体间融合患者的融合评价进行了对比研究。所有90例患者/172节段在手术暴露前行正位、侧位和Ferguson位照片, 其中44例患者/109个节段行薄层螺旋CT矢状位和冠状位重建检查。融合判定标准为BSF量表(表2)。结果表明X射线片和CT对假关节的敏感性均为100%, 对融合成功的阴性预测值也为100%。二者的特异性均接近90%且差异无显著性意义。他们认为X射线片可以对融合或假关节提供强有力的证据, 相较于X射线片, CT无法给出更多的信息。Ghiselli等^[24]以手术暴露为参照, 比较了单节段前路颈椎间盘切除融合患者使用动力位片和CT两种方法判断融合。以角度 $> 4^\circ$ 定义为假关节形成时, 动力位片的阳性预测值为100%, 但阴性预测值仅为57%。以角度 $> 1^\circ$ 定义为假关节形成时, 阳性预测值和阴性预测值分别为100%和79%。CT的阳性预测值和阴性预测值分别为100%和73%。两种方法联合应用的阳性预测值和阴性预测值分别为100%和92%。在另一项类似的研究中, Buchowski等^[38]将X射线片融合定义为: 骨桥形成和棘突位移小于1 mm, CT融合定义为: 骨桥形成和CT冠状位、矢状位重建下植骨区无透光带。结果发现X射线片、CT和手术暴露的符合率分别为81%和83.3%。但是X射线片($\kappa=0.31-0.55$)的评价者间可信度低于CT($\kappa=0.73-0.87$)。Carreon等^[39]使用CT和手术暴露对置入金属Cage前路腰椎椎体间融合的患者进行评价。5名独立评价者分别依据3种不同的融合标准: ①Cage中间或周围有骨桥连续。②“哨兵征”。③“后方哨兵征”。3种标准的敏感性、特异性和 κ 值分别为70%-97%、28%-85%、0.25; 13%-33%、49%-92%; 0.34; 33%-87%、56%-90%、0.23。在1项山羊模型的研究中, Sugiyama等^[40]证明平片+动力位片+CT的特异性、敏感性、准确性远大于单纯X射线片(平片或平片+动力位片)。他们认为CT的可靠性要远高于X射线片。

由此可以看出, CT在特异性、敏感性评价者一致性等方面较X射线片相对更有优势。因此也被认为是判断融合的“影像学金标准”^[35]。而X射线片以其低廉的价格, 简单、快捷的检查方法, 仍然是临床和科研中使用最为广泛的评价手段。Gruskay等^[35]在综合分析了X射线片、CT、MRI、骨扫描等特点后, 提出了他们对融合的判定策略。在这一策略中, 任何一种手段都不是独立存在, 而是在整个评价体系中发挥自己的优势。在临床工作中, 作为一种物美价廉的检查手段, 在评价融合时, X射线价差的优先等级应高于CT。只有在平片难以判断, 或高度怀疑不融合时才需要行CT检查。而在科研活动中, 越来越多的高质量研究都把CT作为一项必要的判断指标。

3 讨论 Discussion

在脊柱椎间融合的影像学判断体系中, 平片和CT始终占据最为重要的位置。其他影像学方法如MRI、超声等仅能起到辅助评价的作用。X射线和CT的优劣一直是脊柱外科医生讨论的热点。X射线片是使用最为广泛的评价手段, 其基本方法分为静态X射线片和动态X射线片两种。静态判断方法常常对结果进行定性的主观描述, 或将融合状态分为若干个等级。动态测量方法通过对脊柱过伸过屈时的相关指标进行测量, 对融合进行评价。目前, 对颈、腰椎动力位片的基本测量方法和测量指标都相对固定, 而对于融合的判断标准在不同文献中存在一定差异。此外, 体位摆放和测量误差等因素都会对结果产生较大影响。从现有文献资料来看, CT检查的敏感性、特异性等指标要明显优于X射线片(静态或动态)。是影像学评价脊柱融合的金标准。在进行临床科研时, 评价结果更加客观、准确。但因其存在放射剂量大、检查价格昂贵等弊端, 在高质量杂志投稿时, 可能会涉及伦理学问题。合理的融合评价策略应是包含了病史、症状、体征、辅助检查等多因素的系统工程。单就影像学检查而言, 临床中应遵循由简单到复杂的原则, 先行平片检查, 在对结果判断困难时, 再行CT检查。在科学研究时, 应尽可能纳入CT评价指标, 提高结果的可信性。

总结: 手术暴露是评价融合的“金标准”。X射线片和CT是使用最为广泛的判定手段, 其基本原理和方法是类似的, 但相较于X射线片, CT的判断结果更加可靠。MRI、骨扫描等其他影像学检查无法准确、直接的对融合进行评价。综合判断症状、体征和各种影像资料是更为合理的融合评价策略。临床及科研工作中可依据具体情况选择合理的影像学检查手段。

致谢: 第一作者和通讯作者构思并设计综述, 分析并解析数据, 所有作者共同起草, 通讯作者审校。

利益冲突: 所有作者共同认可文章无相关利益冲突。

伦理问题: 无涉及伦理冲突的内容。

文章查重: 文章出版前已经过 CNKI 反剽窃文献检测系统进行 3 次查重。

文章外审: 本刊实行双盲外审制度, 文章经国内小同行外审专家审核, 符合本刊发稿宗旨。

学术术语: 脊柱椎间融合的并发症? 脊柱椎间融合是使用最为广泛的治疗脊柱退行性疾病、创伤、肿瘤及畸形的手术方式。其主要并发症包括假关节形成、内固定损坏、椎体移位、沉降导致的神经症状及慢性疼痛等, 而导致这些并发症的根本原因就是椎体间未融合或者融合失败。因此, 对患者术后椎间融合状态的正确评估就显得尤为重要。

作者声明: 文章第一作者对研究和撰写的论文中出现的不良行为承担责任。论文中涉及的原始图片、数据(包括计算机数据库)记录及样本已按照有关规定保存、分享和销毁, 可接受核查。

文章版权: 文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

4 参考文献 References

- [1] Fh A. Transplantation of a portion of the tibia into the spine for Pott's disease. J Bone Joint Surg Am. 1911;57: 885-886.
- [2] Fischgrund JS, Mackay M, Herkowitz HN, et al. 1997 Volvo Award winner in clinical studies. Degenerative lumbar spondylolisthesis with spinal stenosis: a prospective, randomized study comparing decompressive laminectomy and arthrodesis with and without spinal instrumentation. Spine (Phila Pa 1976). 1997;22(24): 2807-2812.
- [3] Carreon LY, Djurasovic M, Glassman SD, et al. Diagnostic accuracy and reliability of fine-cut CT scans with reconstructions to determine the status of an instrumented posterolateral fusion with surgical exploration as reference standard. Spine (Phila Pa 1976). 2007;32(8): 892-895.
- [4] Brantigan JW, Steffee AD. A carbon fiber implant to aid interbody lumbar fusion. Two-year clinical results in the first 26 patients. Spine (Phila Pa 1976). 1993;18(14): 2106-2107.
- [5] Min SH, Yoo JS. The clinical and radiological outcomes of multilevel minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion. Eur Spine J. 2013;22(5): 1164-1172.
- [6] Fogel GR, Toohey JS, Neidre A, et al. Fusion assessment of posterior lumbar interbody fusion using radiolucent cages: X-ray films and helical computed tomography scans compared with surgical exploration of fusion. Spine J. 2008; 8(4): 570-577.
- [7] Santos ER, Goss DG, Morcom RK et al. Radiologic assessment of interbody fusion using carbon fiber cages. Spine (Phila Pa 1976). 2003;28(10): 997-1001.
- [8] McAfee PC, Regan JJ, Geis WP, et al. Minimally invasive anterior retroperitoneal approach to the lumbar spine. Emphasis on the lateral BAK. Spine (Phila Pa 1976). 1998; 23(13): 1476-1484.
- [9] Christensen FB, Laursen M, Gelineck J, et al. Interobserver and intraobserver agreement of radiograph interpretation with and without pedicle screw implants: the need for a detailed classification system in posterolateral spinal fusion. Spine (Phila Pa 1976). 2001;26(5): 538-543; discussion 543-534.

- [10] Shah RR, Mohammed S, Saifuddin A, et al. Comparison of plain radiographs with CT scan to evaluate interbody fusion following the use of titanium interbody cages and transpedicular instrumentation. *Eur Spine J.* 2003;12(4): 378-385.
- [11] Cleveland M, Bosworth DM, Thompson FR. Pseudarthrosis in the lumbosacral spine. *J Bone Joint Surg Am.* 1948. 30: 302-312.
- [12] Simmons JW. Posterior lumbar interbody fusion with posterior elements as chip grafts. *Clin Orthop Relat Res.* 1985;(193): 85-89.
- [13] McAlister WH, Shackelford GD. Measurement of spinal curvatures. *Radiol Clin North Am.* 1975;13(1): 113-121.
- [14] Hutter CG. Posterior intervertebral body fusion. A 25-year study. *Clin Orthop Relat Res.* 1983;(179): 86-96.
- [15] Goldstein C, Drew B. When is a spine fused? *Injury.* 2011; 42(3): 306-313.
- [16] Behrbalk E, Uri O, Parks RM, et al. Fusion and subsidence rate of stand alone anterior lumbar interbody fusion using PEEK cage with recombinant human bone morphogenetic protein-2. *Eur Spine J.* 2013;22(12): 2869-2875.
- [17] Korovessis P, Koureas G, Zacharatos S, et al. Correlative radiological, self-assessment and clinical analysis of evolution in instrumented dorsal and lateral fusion for degenerative lumbar spine disease. Autograft versus coralline hydroxyapatite. *Eur Spine J.* 2005; 14(7): 630-638.
- [18] Glaser J, Stanley M, Sayre H, et al. A 10-year follow-up evaluation of lumbar spine fusion with pedicle screw fixation. *Spine (Phila Pa 1976).* 2003;28(13): 1390-1395.
- [19] Kuslich SD, Ulstrom CL, Griffith SL, et al. The Bagby and Kuslich method of lumbar interbody fusion. History, techniques, and 2-year follow-up results of a United States prospective, multicenter trial. *Spine (Phila Pa 1976).* 1998; 23(11): 1267-1278; discussion 1279.
- [20] McAfee PC, Boden SD, Brantigan JM, et al. Symposium: a critical discrepancy-a criteria of successful arthrodesis following interbody spinal fusions. *Spine (Phila Pa 1976).* 2001;26(3): 320-334.
- [21] Burkus JK, Foley K, Haid RW, et al. Surgical Interbody Research Group--radiographic assessment of interbody fusion devices: fusion criteria for anterior lumbar interbody surgery. *Neurosurg Focus.* 2001;10(4): E11.
- [22] Kanayama M, Hashimoto T, Shigenobu K, et al. A prospective randomized study of posterolateral lumbar fusion using osteogenic protein-1 (OP-1) versus local autograft with ceramic bone substitute: emphasis of surgical exploration and histologic assessment. *Spine (Phila Pa 1976).* 2006;31(10): 1067-1074.
- [23] Lee CS, Chung SS, Choi SW, et al. Critical length of fusion requiring additional fixation to prevent nonunion of the lumbosacral junction. *Spine (Phila Pa 1976).* 2010;35(6): E206-211.
- [24] Ghiselli G, Wharton N, Hipp JA, et al. Prospective analysis of imaging prediction of pseudarthrosis after anterior cervical discectomy and fusion: computed tomography versus flexion-extension motion analysis with intraoperative correlation. *Spine (Phila Pa 1976).* 2011; 36(6): 463-468.
- [25] Cannada LK, Scherping SC, Yoo JU, et al. Pseudoarthrosis of the cervical spine: a comparison of radiographic diagnostic measures. *Spine (Phila Pa 1976).* 2003;28(1): 46-51.
- [26] Taylor M, Hipp JA, Gertzbein SD, et al. Observer agreement in assessing flexion-extension X-rays of the cervical spine, with and without the use of quantitative measurements of intervertebral motion. *Spine J.* 2007;7(6): 654-658.
- [27] Ito Z, Imagama S, Kanemura T, et al. Volumetric change in interbody bone graft after posterior lumbar interbody fusion (PLIF): a prospective study. *Eur Spine J.* 2014;23(10): 2144-2149.
- [28] Carreon LY, Glassman SD, Djurasovic M. Reliability and agreement between fine-cut CT scans and plain radiography in the evaluation of posterolateral fusions. *Spine J.* 2007; 7(1): 39-43.
- [29] Stradiotti P, Curti A, Castellazzi G, et al. Metal-related artifacts in instrumented spine. Techniques for reducing artifacts in CT and MRI: state of the art. *Eur Spine J.* 2009;18 Suppl 1: 102-108.
- [30] Williams AL, Gornet MF, Burkus JK. CT evaluation of lumbar interbody fusion: current concepts. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2005;26(8): 2057-2066.
- [31] Siepe CJ, Stosch-Wiechert K, Heider F, et al. Anterior stand-alone fusion revisited: a prospective clinical, X-ray and CT investigation. *Eur Spine J.* 2014.
- [32] Takeuchi M, Kamiya M, Wakao N, et al. Large volume inside the cage leading incomplete interbody bone fusion and residual back pain after posterior lumbar interbody fusion. *Neurosurg Rev.* 2015.
- [33] Biswas D, Bible JE, Bohan M, et al. Radiation exposure from musculoskeletal computerized tomographic scans. *J Bone Joint Surg Am.* 2009;91(8):1882-1889.
- [34] Fazel R, Krumholz HM, Wang Y, et al. Exposure to low-dose ionizing radiation from medical imaging procedures. *N Engl J Med.* 2009;361(9): 849-857.
- [35] Gruskay JA, Webb ML, Grauer JN. Methods of evaluating lumbar and cervical fusion. *Spine J.* 2014;14(3): 531-539.
- [36] Albert TJ, Pinto M, Smith MD, et al. Accuracy of SPECT scanning in diagnosing pseudoarthrosis: a prospective study. *J Spinal Disord.* 1998;11(3): 197-199.
- [37] Concia E, Prandini N, Massari L, et al. Osteomyelitis: clinical update for practical guidelines. *Nucl Med Commun.* 2006; 27(8): 645-660.
- [38] Buchowski JM, Liu G, Bunmaprasert T, et al. Anterior cervical fusion assessment: surgical exploration versus radiographic evaluation. *Spine (Phila Pa 1976).* 2008;33(11): 1185-1191.
- [39] Carreon LY, Glassman SD, Schwender JD, et al. Reliability and accuracy of fine-cut computed tomography scans to determine the status of anterior interbody fusions with metallic cages. *Spine J.* 2008;8(6): 998-1002.
- [40] Sugiyama S, Wullschlegler M, Wilson K, et al. Reliability of clinical measurement for assessing spinal fusion: an experimental sheep study. *Spine (Phila Pa 1976).* 2012;37(9): 763-768.