

# 椎体成形术后邻近椎体再骨折的研究进展

范忠阳, 柯珍勇, 陈萧霖\*

重庆医科大学附属第二医院骨科, 重庆

收稿日期: 2025年8月9日; 录用日期: 2025年9月2日; 发布日期: 2025年9月10日

## 摘要

经皮椎体成形术(PVP)及经皮椎体后凸成形术(PKP)是治疗骨质疏松性椎体压缩性骨折(OVCF)的常用微创技术,但术后邻近椎体再骨折(AVF)是常见并发症。AVF发生率较高,高发于术后2~3个月。其危险因素包括患者自身因素(如高龄、低骨密度、女性等)、手术相关因素(如骨水泥渗漏、注入量不当等)及术后管理因素(如未规范抗骨质疏松治疗)。预防需从术前评估、术中技术优化及术后长期管理入手。目前研究存在诊断标准不统一等局限,未来需进一步探索相关机制与预防策略。

## 关键词

骨质疏松, 骨水泥, 椎体成形术, 骨质疏松治疗

# Advances in Research on Adjacent Vertebral Fracture after Vertebroplasty

Zhongyang Fan, Zhenyong Ke, Xiaolin Chen\*

Department of Orthopedic Surgery, The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: Aug. 9<sup>th</sup>, 2025; accepted: Sep. 2<sup>nd</sup>, 2025; published: Sep. 10<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Percutaneous Vertebroplasty (PVP) and Percutaneous Kyphoplasty (PKP) are common minimally invasive techniques for the treatment of Osteoporotic Vertebral Compression Fractures (OVCF). However, adjacent vertebral fracture (AVF) after surgery is a common complication. The incidence of AVF is relatively high, with a peak occurring 2~3 months after surgery. Its risk factors include patient-related factors (such as advanced age, low bone mineral density, gender, etc.), surgery-related factors (such as bone cement leakage, inappropriate injection volume, etc.), and postoperative management factors (such as non-standardized anti-osteoporotic treatment). Prevention should start

\*通讯作者 Email: xyz\_333@qq.com

文章引用: 范忠阳, 柯珍勇, 陈萧霖. 椎体成形术后邻近椎体再骨折的研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(9): 548-555. DOI: 10.12677/acm.2025.1592525

from preoperative evaluation, intraoperative technical optimization, and long-term postoperative management. Current studies have limitations such as inconsistent diagnostic criteria, and future research needs to further explore the relevant mechanisms and prevention strategies.

## Keywords

Osteoporosis, Bone Cement, Vertebroplasty, Osteoporosis Treatment

Copyright © 2025 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性骨折(Osteoporotic Vertebral Compression Fracture, OVCF)是中老年人群中常见的脊柱损伤,严重影响患者的生活质量并带来沉重的社会经济负担。经皮椎体成形术(Percutaneous Vertebroplasty, PVP)及其改良术式经皮椎体后凸成形术(Percutaneous Kyphoplasty, PKP)作为治疗 OVCF 的经典微创技术,因其能迅速缓解疼痛、稳定骨折椎体而得到广泛应用[1][2]。然而,随着该技术的普及和远期随访病例的增多,一个日益突出的并发症——术后邻近椎体再骨折(Adjacent Vertebral Fracture, AVF)引起了临床和学术界的广泛关注[3][4]。AVF 不仅会导致患者疼痛复发、脊柱畸形加重,甚至可能需要再次手术干预,显著增加了患者的痛苦和医疗成本。因此,深入探究 AVF 的发生率、危险因素、生物力学机制及预防策略,对于优化临床决策、改善患者预后具有至关重要的意义。本报告旨在对椎体成形术后邻近椎体再骨折的研究进展进行系统性的描述。

## 2. 邻近椎体再骨折的流行病学特征

### 2.1. 发生率统计

椎体成形术后邻近椎体再骨折的发生率在不同研究中报告的数据存在显著差异,这可能与研究设计、样本量、随访时间、诊断标准及地区差异等因素有关。综合近年来的多项研究,AVF 的总体发生率大致在 6.5%至 26.3%的区间内浮动[5]。一些具体的队列研究提供了更为精确的数据。例如,一项多中心研究纳入 2216 例患者,在平均 15.8 个月的随访中,发现 AVF 的发生率为 10.24% [6]。另一项针对 268 例患者的研究报告的发生率为 17.5% [7],而一项包含了 110 例患者的回顾性分析则显示,非手术椎体再骨折的发生率为 21.82%,其中邻近椎体骨折占到了 58.33% [8]。一项研究报告的发生率同样高达 54.2% [9],尽管这可能是由于特定的患者群体或诊断标准所致。一项样本量为 86 例患者的研究发现,19.9%的患者出现新发椎体骨折,其中 41.4%发生在邻近节段[10]。此外,一项重要的 Meta 分析整合了多项研究数据,得出的平均发生率为 14% [11]。这些数据表明,AVF 是椎体成形术后一个不容忽视的常见并发症。

### 2.2. 发生时间

AVF 的发生时间具有一定的规律性,多数研究表明其高发期集中在术后早期。多项研究观察到,大部分 AVF 发生在术后 2 至 3 个月内[12]。一项前瞻性研究显示,17.6%的患者在术后 6 个月内出现邻近椎体新鲜骨折[13]。另一项研究则发现,67%的新发骨折发生在术后 30 天内。邻近椎体骨折的中位诊断时间约为 55 天,显著早于非邻近椎体骨折的 127 天[10]。这种早期集中的现象提示,手术本身带来的生

物力学环境改变可能是 AVF 发生的重要触发因素。

### 2.3. 研究现状与局限

尽管已有大量关于 AVF 发生率的研究,但截至 2025 年,全球范围内仍缺乏统一诊断标准和随访协议的大规模、多中心前瞻性队列研究[6] [12]。现有研究多为单中心、回顾性分析,存在选择偏倚和信息偏倚的风险[10] [14] [15]。例如,一项 2023 年发表的前瞻性研究提供了高质量的数据,但其仅为单中心研究[15]。因此,未来亟需开展设计严谨的全球多中心合作项目,以获取更可靠的流行病学数据,并为风险分层和预防策略的制定提供更高等级的证据。

## 3. 邻近椎体再骨折的独立危险因素

AVF 的发生是多因素共同作用的结果,识别其独立危险因素是预防工作的核心。目前,研究普遍认为危险因素可分为患者自身因素、手术相关生物力学因素以及术后管理因素三大类。

### 3.1. 患者相关因素

1) 骨质疏松程度与骨密度(BMD): 这是被最广泛认可的核心危险因素。术前骨密度低下、骨质疏松严重是导致 AVF 的独立危险因素[5] [7] [9]。骨骼质量差的椎体无法有效承受和分散应力,使得经手术强化的椎体与脆弱的邻近椎体之间形成巨大的力学性能差异,从而增加了邻近椎体的骨折风险[6]。

2) 高龄: 年龄是另一个被反复证实的独立危险因素,尤其对于 70 岁或 80 岁以上的患者,AVF 风险显著增高。一项研究甚至指出,80 岁以上患者的 AVF 发生率可高达 33%以上,而 80 岁以下患者约为 9% [7] [16] [17]。

3) 性别: 多项研究表明,女性是 AVF 的高风险人群[6] [11]。这可能与女性绝经后雌激素水平下降,骨质流失速度更快有关。

4) 肌肉退变: 一项回顾性分析结果提示竖脊肌、腰大肌脂肪浸润程度高均是 AVF 的独立危险因素[18]。

5) 既往骨折史: 术前存在其他部位的脆性骨折史,或本次手术涉及多个椎体骨折,均是 AVF 的独立危险因素[8] [17] [19]。这反映了患者全身骨骼系统性的脆弱。

6) 脊柱畸形与生物力学状态: 合并脊柱退行性侧弯是 PKP 术后发生再骨折的独立危险因素[19] [20]。此外,骨折发生在活动度大的胸腰段也被认为是危险因素,因为该区域承受的应力更大[11] [21]。

7) 其他合并症: 吸烟史、糖尿病、慢性阻塞性肺疾病等也被一些研究列为危险因素[6] [19] [22]。这些疾病可能通过影响骨代谢、或因某些疾病需要激素治疗(如糖皮质激素) [23]而加重骨质疏松导致术后再次骨折。

### 3.2. 手术相关生物力学因素

1) 骨水泥渗漏: 这是争议较少且影响显著的危险因素。特别是骨水泥经骨折线渗漏至邻近的椎间盘内,会严重破坏椎间盘的缓冲功能,改变载荷传递路径,导致邻近椎体终板应力急剧升高,从而极大地增加了 AVF 的风险[5] [7] [9]。

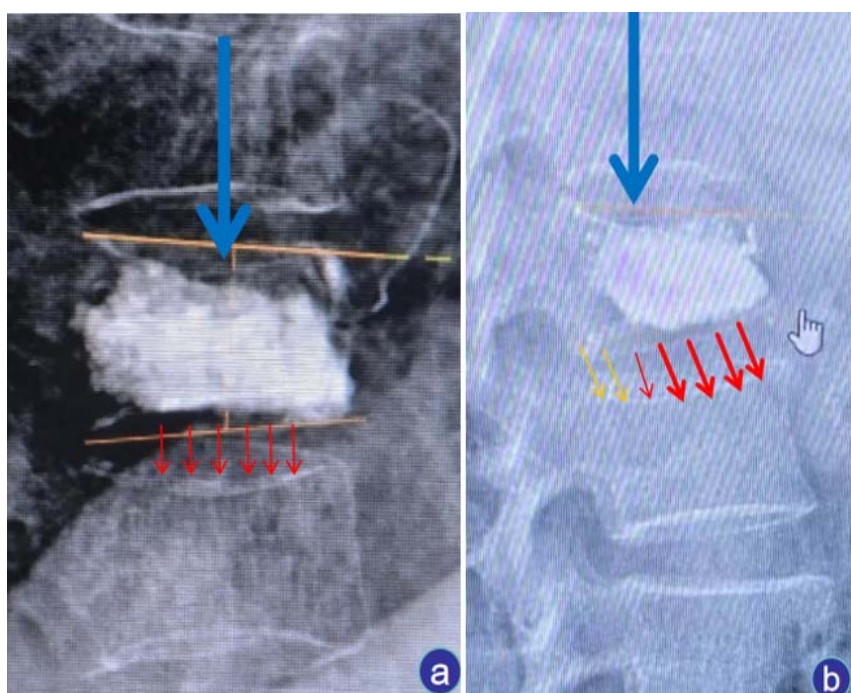
2) 骨水泥注入量: 骨水泥的注入量是一个存在争议的因素。一方面,过多的骨水泥注入量(如 $\geq 3.5$  ml 或 4 ml)被许多研究认为是危险因素[7] [9] [22] [24]因为它会过度增强椎体刚度,加剧与邻近椎体的力学不匹配。但另一方面,也有研究提出,骨水泥注入量不足,未能有效填充骨折裂隙,同样会成为 AVF 的危险因素。因此,追求“适量”而非“极量”或“少量”的个体化精准注入可能是关键[6]。

3) 骨水泥分布模式: 骨水泥在椎体内的分布形态同样重要。致密型分布(即骨水泥呈团块状集中分布)被认为是危险因素,因为它会导致局部应力集中[7] [15] [25]。理想的分布模式是均匀、弥散的“海绵状”

分布, 并实现双侧对称填充, 这样能更有效地分散应力[26]-[28]。

4) 椎体高度恢复与后凸角矫正: 术中对压缩椎体的高度恢复率过高, 或对后凸畸形(Cobb 角)的过度矫正, 会改变脊柱的正常生理曲度, 增加邻近节段的代偿性负荷, 从而成为 AVF 的独立危险因素[16][29][30], 当胸腰段的椎体角度回复率超过 0.35 时, 更易发生再骨折[23]。

5) 骨水泥强化椎体后与临近椎体间的力学传导假说涉及多个关键机制(图 1(a)、图 1(b)), 主要围绕应力重分布、刚度失衡和骨水泥特性等因素[31][32]: 骨水泥强化后, 伤椎刚度显著提高, 导致脊柱载荷传递路径改变。正常椎体间的应力均匀分布, 但强化后伤椎弹性形变减小: 骨水泥承担更多载荷, 临近椎体需代偿性承受更大形变终板应力集中: 若骨水泥分布不均(尤其终板下区域), 会形成“应力阶梯”, 邻椎终板局部应力骤增, 骨折风险上升。椎间盘压力升高: 骨水泥增强椎间盘轴向刚度, 椎间盘内压增加约 19%, 进一步传导至邻椎终板。



**Figure 1.** (a) Sagittal view of diffuse bone cement distribution in L1 (Blue arrows: stress from superior vertebra; red arrows: stress transmitted through cement to inferior disc and vertebra); (b) Sagittal view of non-diffuse bone cement distribution in L1 (Blue arrows: stress from superior vertebra; yellow arrows: stress transmitted through bone; thin red arrows: stress concentration; thick red arrows: stress through cement to inferior structures)

**图 1.** (a) L1 骨水泥矢状位弥散分布(蓝色箭头为来自椎体上方的应力, 红色箭头为经骨水泥传导致下方间盘和下位椎体的应力); (b) L1 骨水泥矢状位非弥散分布(蓝色箭头为来自椎体上方的应力, 黄色箭头为经骨组织传导致下方间盘和下位椎体的应力, 较细红色箭头为应力改变处, 较粗红色箭头经骨水泥传导致下方间盘和下位椎体的应力)

### 3.3. 术后管理因素

1) 抗骨质疏松治疗: 术后未能接受规范、规律的抗骨质疏松药物治疗是导致 AVF 最重要且可干预的危险因素之一[6][7][11]。椎体成形术仅解决了局部骨折问题, 并未改变患者全身性的骨质疏松状态。因此, 系统的抗骨质疏松治疗被认为是预防 AVF 的保护性因素[1][19]。

2) 规律康复锻炼: 术后缺乏规律的功能锻炼也被证实与 AVF 风险增加相关[6]。适当的锻炼有助于



增强核心肌群力量,改善脊柱稳定性。

## 4. 预防与治疗策略

基于对 AVF 危险因素和生物力学机制的深入理解,一套综合性的预防策略正在形成,涵盖了从术前评估到术中技术优化,再到术后长期管理的全过程。

### 4.1. 术前风险评估与个体化决策

预防始于术前。对所有拟行椎体成形术的患者,应进行全面的 AVF 风险评估。评估内容应包括年龄、性别、BMD、既往骨折史、脊柱形态、骨折节段等[15][33]。对于评估出的高风险患者,需要进行审慎的决策,充分告知其 AVF 风险,并更积极地规划术后管理方案。在某些极端高风险情况下,甚至可以考虑是否选择其他治疗方式。

### 4.2. 手术技术的精细化与优化

术中操作的精细化是降低 AVF 风险的关键环节。这包括:

- 1) 精准的骨水泥注入:避免过量或不足,根据椎体大小和骨折类型实现个体化注入量[6][34]。
- 2) 理想的弥散分布:采用双侧入路或通过调整穿刺针位置,力求骨水泥在椎体内均匀弥散,与上下终板广泛接触,避免形成团块状集中[26]-[28]。
- 3) 严格控制渗漏:采用高粘度骨水泥,在透视下严密监视,一旦发现渗漏迹象立即停止注射[35][36]。
- 4) 适度的畸形矫正:尤其在 PKP 手术中,应避免对椎体高度和后凸角度的过度追求,以维持脊柱的整体力线平衡[16][29][30]。

### 4.3. 全程化、规范化的抗骨质疏松治疗

这是预防 AVF 最根本、最有效的措施。所有接受椎体成形术的患者,无论术前评估风险高低,都应在术后立即启动并长期坚持规范的抗骨质疏松治疗[6]。常用药物包括双膦酸盐类(如阿仑膦酸钠、唑来膦酸)、特立帕肽(甲状旁腺激素类似物)、地舒单抗等[37][38]。多项研究显示,作为一种促骨形成的药物,特立帕肽在改善骨密度、促进骨代谢、降低再骨折率方面可能优于传统的抗骨吸收药物,特立帕肽联合抗骨吸收药物的方案也显示出良好的应用前景[39]。同时,必须保证足量的钙剂和维生素 D 摄入。

### 4.4. 康复锻炼与生活方式干预

指导患者进行循序渐进的腰背肌功能锻炼,佩戴支具保护,并改变不良生活习惯(如戒烟、避免摔倒),是综合预防策略中不可或缺的一环[6]。

## 5. 总结与展望

截至 2025 年 7 月,椎体成形术后邻近椎体再骨折(AVF)的研究已取得长足进步。我们已经认识到,AVF 是一个发生率较高、由患者基础条件、手术生物力学改变和术后管理等多因素共同决定的复杂并发症。尽管关于椎体成形术本身是否为独立风险因素的争论仍在继续,但一个明确的共识是:通过优化手术技术和实施全程化的抗骨质疏松管理,AVF 的风险是可以被显著降低的。然而,当前研究仍存在诸多局限性,包括高质量前瞻性研究的缺乏、诊断和随访标准的异质性、以及对部分危险因素交互作用的认知不足[15][40]。未来的研究可聚焦于以下几个方向:

- 1) 开展高质量的临床研究:需启动全球多中心、大样本、长随访的前瞻性队列研究和随机对照试验(RCT),采用统一的 MRI 诊断标准和系统化治疗方案(如包含特立帕肽、双膦酸盐等特定药物的治疗组),

以明确 AVF 的真实发生率, 验证并量化各项危险因素的权重, 制定统一的 AVF 诊断标准。

2) 开发新型生物材料: 持续研发和应用具有更低弹性模量、更好生物相容性和骨整合能力的“智能”骨水泥, 从源头上减少生物力学不匹配[36]。

3) 开展临床影像学与生物力学结合研究: 建议开展一项前瞻性队列研究, 利用定量 CT (QCT) 和高分辨率 MRI 评估术前椎体微结构和椎旁肌脂肪浸润程度[29][41][42], 旨在构建一个能精确预测 AVF 风险的多因素离线预测模型。

4) 优化全程管理方案: 探索并标准化针对不同风险分层患者的最佳术后管理路径, 包括抗骨质疏松药物的最佳选择、使用时机、疗程以及个体化康复方案。

综上所述, 对椎体成形术后邻近椎体再骨折的研究正从现象描述走向机制探索和精准预防。通过多学科的持续努力, 我们有望在未来进一步降低这一并发症的发生率, 最大限度地提升 OVCF 患者的治疗效果和远期生活质量。

## 基金项目

重庆市沙坪坝区科技局技术创新项目资助(2024083)及重庆市教委自然科学类科研项目资助(KJQN 202200425)。

## 参考文献

- [1] Garfin, S.R., Yuan, H.A. and Reiley, M.A. (2001) New Technologies in Spine: Kyphoplasty and Vertebroplasty for the Treatment of Painful Osteoporotic Compression Fractures. *Spine*, **26**, 1511-1515. <https://doi.org/10.1097/00007632-200107150-00002>
- [2] Li, H., Wang, Y., Wang, R., Yue, L., Chen, S. and Li, C. (2020) Effects of Rosuvastatin and Zoledronic Acid in Combination on the Recovery of Senile Osteoporotic Vertebral Compression Fracture Following Percutaneous Vertebroplasty. *Journal of International Medical Research*, **48**, 1-10. <https://doi.org/10.1177/0300060520925390>
- [3] 李晓华, 刘永强, 范金鹏. 椎体成形术后继发邻近椎体压缩骨折相关因素的研究进展[J]. 医学综述, 2019, 25(5): 967-972.
- [4] 王大鹏. 防腐标本椎体成形术后邻近椎体再骨折的研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北医科大学, 2017.
- [5] 罗斌, 吴星火, 邸方. 椎体后凸成形术后邻近椎体再发骨折发生率及相关危险因素的分析研究[J]. 创伤外科杂志, 2013, 15(1): 23-27.
- [6] Zhang, Z., Jing, Q., Qiao, R., et al. (2021) Risk Factors Analysis of Adjacent Fractures after Percutaneous Vertebroplasty for Osteoporotic Vertebral Compression Fracture. *Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery*, **35**, 20-25.
- [7] 马良, 艾奔·卡依尔汗, 石长贵. 对经皮椎体成形术后邻椎骨折发生及危险因素的分析[J]. 骨科临床与研究杂志, 2023, 8(6): 363-368.
- [8] 杨进, 荔琦, 常春峰. 脊柱骨质疏松骨折患者椎体成形术后再骨折发生率及危险因素研究[J]. 陕西医学杂志, 2020, 49(12): 1573-1576.
- [9] 林振兴. 经皮椎体成形术后患者邻近椎体再骨折发生的危险因素[J]. 医疗装备, 2021, 34(24): 74-75.
- [10] Trout, A.T., Kallmes, D.F. and Kaufmann, T.J. (2006) New Fractures after Vertebroplasty: Adjacent Fractures Occur Significantly Sooner. *American Journal of Neuroradiology*, **27**, 217-223.
- [11] Zhang, T., Wang, Y., Zhang, P., Xue, F., Zhang, D. and Jiang, B. (2020) What Are the Risk Factors for Adjacent Vertebral Fracture after Vertebral Augmentation? A Meta-Analysis of Published Studies. *Global Spine Journal*, **12**, 130-141. <https://doi.org/10.1177/2192568220978223>
- [12] Mudano, A.S., Bian, J., Cope, J.U., Curtis, J.R., Gross, T.P., Allison, J.J., et al. (2008) Vertebroplasty and Kyphoplasty Are Associated with an Increased Risk of Secondary Vertebral Compression Fractures: A Population-Based Cohort Study. *Osteoporosis International*, **20**, 819-826. <https://doi.org/10.1007/s00198-008-0745-5>
- [13] Robinson, Y., Tschöke, S.K., Stahel, P.F., Kayser, R. and Heyde, C.E. (2008) Complications and Safety Aspects of Kyphoplasty for Osteoporotic Vertebral Fractures: A Prospective Follow-Up Study in 102 Consecutive Patients. *Patient Safety in Surgery*, **2**, Article No. 2. <https://doi.org/10.1186/1754-9493-2-2>

- [14] Fribourg, D., Tang, C., Sra, P., Delamarter, R. and Bae, H. (2004) Incidence of Subsequent Vertebral Fracture after Kyphoplasty. *Spine*, **29**, 2270-2276. <https://doi.org/10.1097/01.brs.0000142469.41565.2a>
- [15] Qian, Y., Hu, X., Li, C., Zhao, J., Zhu, Y., Yu, Y., *et al.* (2023) Development of a Nomogram Model for Prediction of New Adjacent Vertebral Compression Fractures after Vertebroplasty. *BMC Surgery*, **23**, Article No. 197. <https://doi.org/10.1186/s12893-023-02068-6>
- [16] 童奕博, 李明辉. 骨质疏松性椎体骨折患者椎体成形后邻近椎体再发骨折的影响因素[J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(8): 1241-1246.
- [17] 黄天霖, 寇玉辉, 殷晓峰, 等. 椎体强化术后再发椎体骨折的临床特点和危险因素[J]. 北京大学学报(医学版), 2015, 47(2): 237-241.
- [18] Osterhoff, G., Asatryan, G., Spiegl, U.J.A., Pfeifle, C., Jarvers, J. and Heyde, C. (2022) Impact of Multifidus Muscle Atrophy on the Occurrence of Secondary Symptomatic Adjacent Osteoporotic Vertebral Compression Fractures. *Calcified Tissue International*, **110**, 421-427. <https://doi.org/10.1007/s00223-021-00925-1>
- [19] 张智龙, 崔玉石, 吴红飞, 等. 经皮椎体强化术后邻近椎体骨折影响因素 Meta 分析[J]. 河北医学, 2024, 30(2): 210-218.
- [20] 余博臣, 张亮, 高梁斌. PVP/PKP 术后手术椎体再发骨折的研究进展[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2012, 22(2): 183-185.
- [21] 闫亮, 昌震, 贺宝荣, 等. 椎体成形术后邻近椎体骨折的相关危险因素分析[J]. 陕西医学杂志, 2013, 42(6): 676-678.
- [22] 李格, 梅伟, 刘沛霖, 等. 骨质疏松性椎体压缩骨折经皮椎体成形术后邻近椎体再骨折的危险因素探讨[J]. 中医正骨, 2016, 28(6): 18-20.
- [23] Chen, Z., Song, C., Chen, M., Li, H., Ye, Y. and Liu, W. (2021) What Are Risk Factors for Subsequent Fracture after Vertebral Augmentation in Patients with Thoracolumbar Osteoporotic Vertebral Fractures. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **22**, Article No. 1040. <https://doi.org/10.1186/s12891-021-04946-7>
- [24] 沈兆亮, 张仲明, 张铁峰, 等. 经皮椎体后凸成形术治疗骨质疏松性椎体压缩性骨折术后邻椎骨折的临床研究[J]. 中国现代医生, 2017, 55(8): 73-76.
- [25] Huang, S., Wu, X., Zhou, C., Zhang, X., Tang, Z., Qi, X., *et al.* (2024) Static Study and Numerical Simulation of the Influence of Cement Distribution in the Upper and Lower Adjacent Vertebrae on Sandwich Vertebrae in Osteoporotic Patients: Finite Element Analysis. *JOR Spine*, **7**, e1343. <https://doi.org/10.1002/jsp2.1343>
- [26] 简志训, 陈政行, 林建宇, 等. 椎体成形术中不同骨水泥容量及位置的生物力学评估[J]. 中华创伤骨科杂志, 2005(10): 903-907.
- [27] 赵研, 宋启春, 李东, 等. 骨质疏松性椎体压缩骨折不同骨水泥分布的临床观察及生物力学的有限元分析[J]. 创伤外科杂志, 2022, 24(11): 818-824+836.
- [28] 刘伟. 经皮椎体成形术治疗骨质疏松性胸腰段脊柱骨折后邻近椎体再骨折的危险因素分析[J]. 解放军医药杂志, 2017, 29(12): 53-56.
- [29] Kim, M.H., Lee, A.S., Min, S.H. and Yoon, S.H. (2011) Risk Factors of New Compression Fractures in Adjacent Vertebrae after Percutaneous Vertebroplasty. *Asian Spine Journal*, **5**, 180-187. <https://doi.org/10.4184/asj.2011.5.3.180>
- [30] 曹源, 郭金超, 马超, 等. 骨水泥椎体强化与保守治疗骨质疏松性椎体压缩性骨折再骨折风险的 Meta 分析[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2018, 28(9): 792-800.
- [31] Baroud, G., Nemes, J., Heini, P. and Steffen, T. (2003) Load Shift of the Intervertebral Disc after a Vertebroplasty: A Finite-Element Study. *European Spine Journal*, **12**, 421-426. <https://doi.org/10.1007/s00586-002-0512-9>
- [32] 甘秀天. 经皮椎体成形术的实验研究进展[J]. 微创医学, 2009, 4(3): 265-267.
- [33] 朱智敏, 钟华, 黄艳, 等. PVP 治疗骨质疏松性椎体压缩骨折预防相邻椎体骨折的随机对照研究[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2016, 31(9): 919-922.
- [34] Li, Y., Tan, Z., Cheng, Y., Zhang, J. and Wu, H. (2022) High-Viscosity versus Low-Viscosity Cement for the Treatment of Vertebral Compression Fractures: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Medicine*, **101**, e31544. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000031544>
- [35] 郭振鹏, 尚晖, 李小琴, 等. 高粘度与低粘度骨水泥 PVP 治疗骨质疏松性椎体压缩骨折疗效及安全性分析[J]. 生物骨科材料与临床研究, 2016, 13(2): 17-19+23.
- [36] Ghandour, S., Hong, L., Aramesh, M. and Persson, C. (2024) Mechanical Characterization and Cytocompatibility of Lino-leic Acid Modified Bone Cement for Percutaneous Cement Discoplasty. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **158**, Article 106662. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2024.106662>
- [37] Jin, Y.Z., Lee, J.H., Xu, B. and Cho, M. (2019) Effect of Medications on Prevention of Secondary Osteoporotic Vertebral

- Compression Fracture, Non-Vertebral Fracture, and Discontinuation Due to Adverse Events: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **20**, Article No. 39. <https://doi.org/10.1186/s12891-019-2769-8>
- [38] 翟晓, 杨新明, 刘芳宏, 等. 特立帕肽联合利塞膦酸钠治疗骨质疏松椎体压缩骨折患者的骨代谢[J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(35): 5685-5692.
- [39] Yang, C., Wang, F., Huang, X., Zhang, H., Zhang, M., Gao, J., *et al.* (2023) Finite Element Analysis of Biomechanical Effects of Mineralized Collagen Modified Bone Cement on Adjacent Vertebral Body after Vertebroplasty. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **11**, Article 1166840. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1166840>
- [40] Si, F., Yuan, S., Zang, L., Fan, N., Wu, Q., Wang, T., *et al.* (2022) Paraspinal Muscle Degeneration: A Potential Risk Factor for New Vertebral Compression Fractures after Percutaneous Kyphoplasty. *Clinical Interventions in Aging*, **17**, 1237-1248. <https://doi.org/10.2147/cia.s374857>
- [41] 罗锬, 刘家明, 钟南山, 等. 经椎体后凸成形术后邻近椎体骨折的列线图预测模型构建[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2023, 33(8): 724-732.
- [42] 王辉, 王栋, 严志强, 等. MRI 评估多裂肌脂肪浸润独立增加骨质疏松性椎体压缩性骨折风险研究[J]. 浙江创伤外科, 2024, 29(1): 172-175.