

经皮穿刺椎体成形术治疗骨质疏松椎体压缩性骨折的学习曲线及临床疗效分析



展冬冬, 张笑然, 张路通, 李 晶

石河子大学第一附属医院脊柱外科 (新疆石河子 832008)

【摘要】目的 探讨经皮穿刺椎体成形术 (percutaneous vertebroplasty, PVP) 治疗骨质疏松性椎体压缩性骨折 (osteoporotic vertebral compression fracture, OVCF) 的学习曲线和临床疗效, 为优化手术技术和改善患者预后提供参考。**方法** 回顾性分析 2022 年 1 月至 2024 年 3 月于石河子大学第一附属医院脊柱外科行 PVP 治疗的单节段 OVCF 患者的临床资料, 应用累积求和 (cumulative summation, CUSUM) 法分析手术学习曲线, 并将患者分为技术学习组和熟练掌握组, 比较两组患者术中及术后结局指标的差异。**结果** 共纳入 107 例患者, 其中技术学习组 43 例、熟练掌握组 64 例。学习曲线拐点位于第 43 例。熟练掌握组平均手术时长短于技术学习组 (46.41 ± 4.95 min vs. 66.81 ± 8.92 min, $P < 0.001$), 两组患者的住院天数、并发症发生率、术后视觉模拟量表 (visual analogue scale, VAS) 评分、Oswestry 残疾指数 (Oswestry disability index, ODI) 及手术效果满意度差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。**结论** 术者在完成 43 例手术后技术趋于熟练, 学习曲线的不同阶段并未影响患者的临床疗效和生活质量, 但术者应在技术学习阶段注重手术细节和预防并发症发生, 以提高手术安全性。

【关键词】 骨质疏松椎体压缩性骨折; 经皮穿刺椎体成形术; 累积求和法; 学习曲线; 临床疗效

【中图分类号】 R 687.3

【文献标识码】 A

Analysis of learning curve and clinical efficacy of percutaneous vertebroplasty for osteoporotic vertebral compression fracture

ZHAN Dongdong, ZHANG Xiaoran, ZHANG Lutong, LI Jing

Department of Spine Surgery, The First Affiliated Hospital of Shihezi University, Shihezi 832008, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

Corresponding author: LI Jing, Email: doc_kid1412@163.com

【Abstract】Objective To explore the learning curve and clinical efficacy of percutaneous vertebroplasty (PVP) in the treatment of osteoporotic vertebral compression fracture (OVCF), in order to provide references for optimizing surgical techniques and improving patients' prognosis. **Methods** The clinical data of patients with single-segment OVCF who underwent PVP in the Department of Spine Surgery of The First Affiliated Hospital of Shihezi University from January 2022 to March 2024 were retrospectively analyzed. The cumulative summation (CUSUM) method was used to analyze the surgical learning curve, and the patients were divided into the technical learning group and the proficient group. The differences in intraoperative and postoperative

DOI: 10.12173/j.issn.1004-4337.202503054

通信作者: 李晶, 博士, 主任医师, 硕士研究生导师, Email: doc_kid1412@163.com

<https://slyyx.whuzhmedj.com/>

outcome indicators between the two groups were compared. **Results** A total of 107 patients were enrolled, including 43 in the technical learning group and 64 in the proficient group. The inflection point of the learning curve was at the 43rd case. The average operation time of the proficient group was shorter than that of the technical learning group (46.41 ± 4.95 min vs. 66.81 ± 8.92 min, $P < 0.001$). There were no statistically significant differences in hospital stay, complication rate, postoperative visual analogue scale (VAS) scores, Oswestry disability index (ODI) and satisfaction with surgical efficacy between the two groups ($P > 0.05$). **Conclusion** The surgeon's technique becomes proficient after completing 43 cases. The different stages of the learning curve do not affect the clinical efficacy and quality of patients' life, but surgeons should pay attention to surgical details and prevent complications during the technical learning stage to improve surgical safety.

【Keywords】 Osteoporotic vertebral compression fracture; Percutaneous vertebroplasty; Cumulative summation method; Learning curve; Clinical efficacy

骨质疏松性骨折是指在低能量暴力情况下发生的骨折, 常见类型为桡骨远端骨折、髌骨骨折、椎体压缩性骨折等^[1]。在全球人口老龄化进程加速的背景下, 骨质疏松性椎体压缩性骨折 (osteoporotic vertebral compression fracture, OVCF) 已成为骨质疏松的主要继发病变, 是老年骨骼健康优先干预目标。该疾病具有较高的致残率和致死率, 严重影响患者的生活质量^[2-3]。对于轻度 OVCF 患者, 首选治疗方案为卧床休息等保守治疗, 但长期卧床会导致一系列并发症, 如坠积性肺炎、褥疮、下肢深静脉血栓等^[4-5]。对于疼痛症状明显且椎体压缩程度较重的患者, 需进行手术治疗。手术治疗旨在通过增强椎体强度, 缓解患者腰背部疼痛, 使患者能尽早下床活动, 从而降低并发症的发生风险。目前, OVCF 的手术治疗方案主要包括经皮椎体后凸成形术 (percutaneous kyphoplasty, PKP) 和经皮穿刺椎体成形术 (percutaneous vertebroplasty, PVP)^[6]。本研究采用累积求和 (cumulative summation, CUSUM) 法^[7]分析 PVP 治疗 OVCF 的学习曲线, 并评估其临床疗效, 以期减少手术并发症及缩短学习曲线提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 研究对象

选择 2022 年 1 月至 2024 年 3 月石河子大学第一附属医院脊柱外科收治的行 PVP 治疗的 OVCF 患者为研究对象。纳入标准: ①所有手术均由同一名副主任医师主刀完成; ②因低能量创伤引起的单节段 OVCF; ③术前骨密度 (bone mineral density, BMD) 检查结果 ≤ -1.0 标准差

(standard deviation, SD); ④因长期使用糖皮质激素、内分泌紊乱和脊柱感染导致的继发性骨质疏松症。排除标准: ①存在严重心功能不全 (NYHA III-IV 级) 或凝血障碍等手术禁忌证; ②对骨水泥任一成分过敏; ③由原发性或转移性脊柱肿瘤所致病理性骨折; ④合并全身性感染或注射部位皮肤感染。本研究经石河子大学第一附属医院医学伦理委员会批准 (KJ2025-288-01)。

1.2 手术准备

1.2.1 术前准备

评估患者术前影像学资料, 并详细询问其是否有高血压、冠心病及凝血障碍性疾病病史, 是否口服抗凝药物, 并检测患者的凝血指标。术前应停用抗凝药物, 并于术前 24 h 停用低分子肝素, 以降低术中出血风险, 保证手术安全进行。

1.2.2 手术过程

患者呈俯卧位, 放置在可透视的 Wilson's 体位架上, 腹部悬空, 体位固定舒适。在 G 型臂 X 线机透视下, 根据椎弓根的位置确定单侧经皮肤穿刺点, 并进行标记。在术区进行常规消毒铺巾后, 于标记点采用 1% 利多卡因行骨膜局部浸润麻醉。在穿刺点皮肤作 3~5 mm 切口, 经 15 G 套管式穿刺针精准穿刺至骨膜层, 在 G 型臂 X 线机监视下使用“锤击进针”方式沿椎弓根方向逐步进针, 直到穿刺套管的尖端在侧位视图中到达椎体的前和中三分之一位置以创建工作通道。通过工作通道逐渐将骨水泥注入椎体, 术中透视观察骨水泥在椎体中渗透情况, 注射完成待骨水泥完全凝固后, 撤出穿刺通道, 对穿刺点进行加压止血, 并观察患者的生命体征、是否有过敏反应及并发症。

1.2.3 术后处理

嘱患者术后 6 h 内卧床休息, 避免骨水泥移位或渗漏, 6 h 后可佩戴腰围适当下地活动。所有病人均未常规使用抗菌药物。术后择期清洁换药, 并告知患者避免外伤以及弯腰负重等动作, 以免造成新发骨折, 并且终身规律进行抗骨质疏松治疗。围手术期收集资料, 包括手术时长(皮肤消毒至切口闭合)、住院天数和并发症; 术后出院前复查 X 线片, 定期随访并进行 X 线检查。

1.3 观察指标

使用 Oswestry 残疾指数 (Oswestry disability index, ODI) 分别于术前、术后 1 个月、术后 3 个月、术后 6 个月及术后 1 年对患者的功能障碍程度进行评估, 并使用改良 MacNab 标准评估患者对手术效果的满意度。采用视觉模拟量表 (visual analogue scale, VAS) 评估患者的疼痛程度, 分别记录术前、术后 1 天、术后 3 天、术后 1 个月、术后 3 个月以及术后 1 年患者腰部疼痛 VAS 评分。量表总分为 100 分, 分值越高, 表明疼痛程度越严重。

1.4 统计分析

采用 Microsoft Excel 2021 软件录入并整理数据, 采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析。连续型变量根据 Shapiro-Wilk 正态性检验结果选择分析方法, 符合正态分布的数据用均数和标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示, 采用独立样本 t 检验; 非正态分布数据用中位数和四分位数间距 [$M(P_{25}, P_{75})$] 表示, 采用 Mann-Whitney U 检验; 纵向重复测量数据则通过 Friedman 检验结合多重比较校正; 分类变量分析采用 χ^2 检验, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

学习曲线分析通过 Python 3.11 软件实现, 基于 CUSUM 算法构建数学模型: $CUSUM = \sum n_i (X_i - U)$, 其中 X_i 为第 i 例手术耗时, U 为平均手术时间。基于散点数据拟合非线性回归曲线, 以曲率突变点对应的横坐标值界定技术熟练所需的最小手术案例量。

2 结果

2.1 学习曲线

采用 PVP 治疗 OVCF 的手术时间随着病例数的增加逐渐缩短。按照手术时间先后将病例依次排序, 按照 CUSUM 分析方法得出拟合方程为 $Y = 0.0012x^3 - 0.3054x^2 + 11.0191x - 6.4611$, 非线性回归分析显示模型拟合良好 ($R^2 = 0.986$)。CUSUM 学习曲线分析识别出第 43 例为技术转折点, 据此将病例划分为技术学习组 (≤ 43 例) 与熟练掌握组 (> 43 例), 见图 1。

2.2 患者一般资料和手术相关指标

基于 CUSUM 拐点将患者划分为技术学习组 ($n=43$) 与熟练掌握组 ($n=64$)。两组患者的性别、年龄、糖尿病和高血压病史、吸烟和饮酒史、BMD 之间差异无统计学意义 ($P > 0.05$), 见表 1。技术学习组的平均手术时长为 (66.81 ± 8.92) min, 熟练掌握组平均手术时长为 (46.41 ± 4.95) min, 两组患者平均手术时长差异有统计学意义 ($P < 0.001$)。全队列手术均顺利完成, 技术学习组发生 4 例并发症 (9.3%), 其中 2 例为骨水泥渗漏、2 例为邻近椎体骨折, 无神经根损伤及出现下肢神经症状; 熟练掌握组共发生 4 例并发症 (6.25%), 均为邻近椎体骨折。技术学习

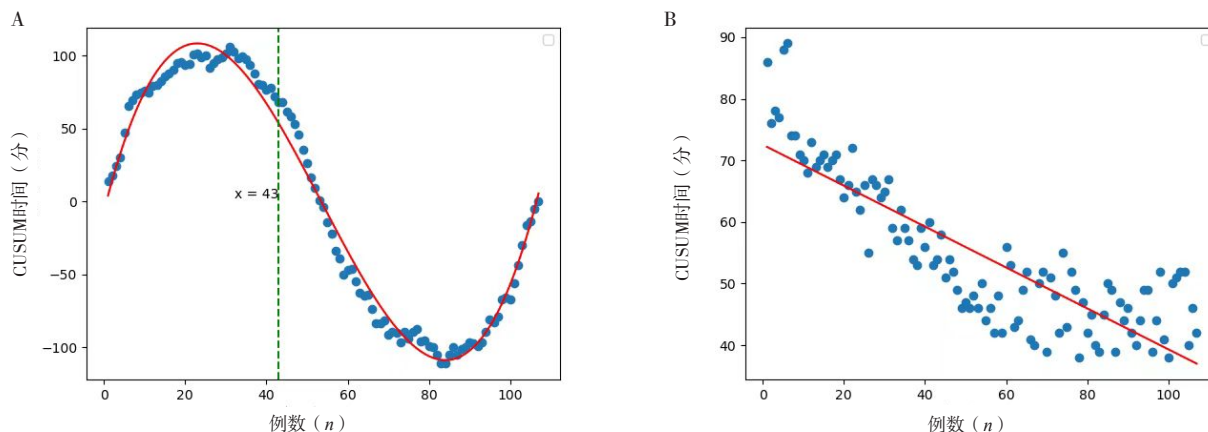


图1 学习曲线分析

Figure 1. Learning curve analysis

注: A. 学习曲线CUSUM模型; B. 学习曲线散点图。

组与熟练掌握组的并发症发生率差异无统计学意义 ($P > 0.05$)，见表 2。

2.3 临床疗效比较

如表 3 所示，两组患者术前及术后所有随访

节点腰部疼痛 VAS 评分、ODI 指数和手术效果满意度差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)，表明在学习曲线的技术学习阶段和熟练掌握阶段并不影响患者的临床疗效和生活质量。

表1 患者一般资料

Table 1. General information of patients

项目	技术学习组 (n=43)	熟练掌握组 (n=64)	χ^2/U 值	P值
性别 (n, %)			0.21	0.643
男性	11 (25.58)	19 (29.69)		
女性	32 (74.42)	45 (70.31)		
年龄 (岁) [M (P ₂₅ , P ₇₅)]	75 (69, 82)	78 (65, 82)	1 452.50	0.629
高血压 (n, %)			2.16	0.141
有	23 (53.49)	25 (39.06)		
无	20 (46.51)	39 (60.94)		
糖尿病 (n, %)			0.13	0.716
有	10 (23.26)	13 (20.31)		
无	33 (76.74)	51 (79.69)		
吸烟史 (n, %)			0.01	0.911
有	1 (2.33)	3 (4.69)		
无	42 (97.67)	61 (95.31)		
饮酒史 (n, %)			0.17	0.683
有	2 (4.65)	2 (3.12)		
无	41 (95.35)	62 (96.88)		
BMD (n, %)			1 452.50	0.437
>-2.5 SD	11 (25.58)	16 (25.00)		
≤-2.5 SD	32 (74.42)	48 (75.00)		

注：BMD，bone mineral density，骨密度；SD，standard deviation，标准差。

表2 患者手术相关指标

Table 2. Surgical parameters of patients

观察指标	技术学习组 (n=43)	熟练掌握组 (n=64)	U/t值	P值
实际住院天数 [M (P ₂₅ , P ₇₅)]	5.00 (5.00, 6.50)	6.00 (5.00, 7.00)	1 222.00	0.321
手术时长 ($\bar{x} \pm s$, min)	66.81 ± 8.92	46.41 ± 4.95	2 730.00	<0.001
并发症 (n, %)			1 418.00	0.556
骨水泥渗漏	2 (4.65)	0 (0.00)		
邻近椎体骨折	2 (4.65)	4 (6.25)		

表3 两组临床疗效比较

Table 3. Comparison of clinical efficacy between two groups

项目	技术学习组 (n=43)	熟练掌握组 (n=64)	U/t值	P值
腰痛VAS评分				
术前 [M (P ₂₅ , P ₇₅)]	89.00 (86.00, 92.00)	89.00 (86.00, 92.00)	-1.27	0.210
术后1天 [M (P ₂₅ , P ₇₅)]	42.00 (34.00, 43.00)	38.00 (34.00, 43.25)	-0.08	0.932
术后3天 ($\bar{x} \pm s$)	19.09 ± 9.29	20.95 ± 5.06	-1.34	0.185
术后1个月 ($\bar{x} \pm s$)	8.40 ± 5.79	8.61 ± 4.45	-0.22	0.829
术后3个月 [M (P ₂₅ , P ₇₅)]	0.00 (0.00, 4.50)	2.00 (0.00, 5.00)	-0.01	0.996
术后1年 [M (P ₂₅ , P ₇₅)]	0.00 (0.00, 0.00)	0.00 (0.00, 0.00)	0.86	0.392
ODI指数 ($\bar{x} \pm s$)				
术前	89.15 ± 8.89	86.01 ± 8.27	1.87	0.065
术后1个月	44.29 ± 8.64	41.81 ± 8.10	1.51	0.133
术后3个月	28.99 ± 5.84	26.98 ± 6.98	1.64	0.104
术后6个月	20.77 ± 6.54	18.58 ± 7.66	1.54	0.126

续表3

项目	技术学习组 (n=43)	熟练掌握组 (n=64)	U/t值	P值
术后1年	11.42 ± 6.07	9.38 ± 8.21	1.40	0.142
手术效果满意度 (n, %)			6.09	0.107
极好	12 (27.91)	12 (18.75)		
良好	27 (62.79)	38 (59.38)		
一般	3 (6.98)	14 (21.88)		
差	1 (2.33)	0 (0.00)		

注：VAS，visual analogue scale，视觉模拟量表；ODI，Oswestry disability index，Oswestry 残疾指数。

3 讨论

OVCF 主要发生在绝经后老年女性群体，若不及时干预，会逐渐形成后凸畸形，导致慢性腰背痛^[8]。目前，PVP 已成为治疗 OVCF 的经典术式，适用于椎体高度严重压缩或无法耐受长期卧床、疼痛症状较重无法缓解且严重影响日常生活和运动能力的患者^[9]。PVP 能够利用骨水泥恢复伤椎形态，防止椎体进一步压缩，增强伤椎骨质硬度，且在骨水泥硬化时可稳定椎体，从而有效缓解患者腰部疼痛^[10-11]。

PVP 和 PKP 是被广泛应用于 OVCF 的微创手术治疗方法，二者均有较好的临床疗效，但在手术技术、学习曲线及并发症发生率方面存在一定差异^[12-13]。PKP 通过球囊扩张恢复椎体高度，并在低压下注入骨水泥，其优点在于减少骨水泥渗漏的风险，创伤较小，但其手术时间较长，且费用较高^[14-15]。相比之下，PVP 手术时间较短，学习曲线相对平缓，更适合临床推广^[16]。PVP 通常采用单侧或双侧椎弓根入路，其中单侧入路在临床上应用更为广泛，其优势主要在于手术时间短、创伤小，但对于某些椎体高度严重丢失或骨折线偏于一侧的病例，双侧入路可能更具优势^[11, 17]。PVP 通过直接注入骨水泥稳定骨折椎体，能够迅速缓解疼痛并恢复椎体强度，从而避免患者因长期卧床导致的并发症，如坠积性肺炎、褥疮和下肢深静脉血栓等^[18]。此外，PVP 无需广泛剥离软组织，具有手术切口小、术中出血量少、术后恢复快等优点，患者可尽早下床活动。在引入骨水泥时，通过渗透患病椎骨的骨小梁空隙来固化骨小梁，从而重新分配骨小梁压力和增强骨骼强度，同时，这一过程使椎骨内的周围神经末梢失活，从而达到减轻疼痛的效果^[2, 19]。

PVP 于 1984 年被首次应用于临床，主要用于治疗血管瘤^[20]。近年来，随着影像导航技术和骨

水泥材料的不断更新迭代，PVP 的手术效果和安全性得到了显著提升。然而，所有微创手术都有其固定的学习曲线，PVP 手术要求术者具备良好的影像学及解剖知识，以及协调能力。在技术学习阶段，对于初学者来说，PVP 仍存在一定的操作难度，如在穿刺针定位和骨水泥注射过程中，容易发生神经损伤、骨水泥渗漏等并发症。本研究显示，PVP 的学习曲线相较于传统开放手术更为陡峭，术者通常需要完成一定数量的病例才能熟练掌握手术要点。因此，实现 PVP 操作技术规范性与安全性的同步提升是推动其临床普及的关键。微创手术经验欠缺的初学者应在技术学习阶段注重影像学及解剖知识的学习，提高穿刺针定位的准确性，以降低并发症发生风险。此外，结合术中导航技术和模拟训练可能有助于缩短学习曲线，提高手术安全性。

学习曲线是评估外科医生掌握新技术所需时间和病例数的重要工具，其拐点展示了术者从技术学习阶段过渡到熟练掌握阶段的手术例数^[21]。本研究通过 CUSUM 分析法拟合 PVP 手术时间与病例数的关系，模型拟合度较高。根据学习曲线，第 43 例手术为拐点，表明在此节点后术者已熟练掌握 PVP 技术。该结果提示 PVP 的学习曲线相对较短，但仍需一定数量的病例积累才能达到技术熟练。基于 CUSUM 拟合曲线的拐点为第 43 例，随着例数的增加，术者手术操作逐渐熟练，学习曲线显示，技术学习组斜率较为陡峭，而熟练掌握组则趋于平稳。散点图显示，手术时长随术者经验累积呈渐进性下降趋势。第一阶段与第二阶段相比较，两组患者在围手术期关键指标之间差异均无统计学意义。这表明尽管在技术学习期间的手术耗时较长，但其临床疗效等评价指标仍达熟练掌握时期水平，说明术者做了充分的术前准备。本研究通过分析发现，技术学习组与熟练掌握组的 BMD 均值及分布比例均无显著差异。这表

明两组患者的骨质疏松严重程度具有高度同质性,骨密度对学习曲线拐点并无直接影响。围手术期并发症发生率无显著组间差异性,但技术学习组患者发生了骨水泥渗漏,提示操作熟练水平直接影响手术安全性。邻近椎体骨折与患者骨质疏松严重程度及术后抗骨质疏松治疗依从性相关。骨水泥渗漏和邻近椎体骨折是技术学习组的主要并发症,而熟练掌握组仅出现邻近椎体骨折。这一结果显示,随着手术经验的积累,术者对骨水泥注射过程操作的控制能力显著提高。此外,邻近椎体骨折是两组均出现的并发症,可能与患者骨质疏松的严重程度及术后康复管理有关^[22]。因此,术后规律的抗骨质疏松治疗和康复锻炼对预防邻近椎体骨折具有重要意义^[23]。

本研究通过分析 CUSUM 学习曲线发现,术者在完成 43 例 PVP 手术后技术趋于熟练。对于初学者而言,在技术学习阶段需重点关注以下操作细节:一是精准穿刺定位,术前应结合计算机断层扫描 CT (computed tomography, CT) 或磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 充分评估椎弓根解剖形态,术中在 G 型臂透视下采用“锤击进针”法逐步调整穿刺角度,避免误入椎管或损伤神经;二是控制骨水泥注射,采用低黏度骨水泥分阶段注入,并实时透视监测弥散范围,若发现椎体后缘渗漏风险,应立即暂停注射并调整针尖位置;三是加强术后抗骨质疏松管理,对重度骨质疏松 (T 值 ≤ -2.5) 患者,需联合双膦酸盐或地舒单抗强化治疗,以降低邻近椎体骨折风险。PVP 作为一种创伤小、恢复快的微创技术,在术者度过学习曲线拐点后,其疗效与安全性可达到稳定水平,适合在具备影像引导条件和规范化培训体系的医疗机构中推广。未来研究可进一步探讨 PVP 与 PKP 的优劣,以及不同入路方式对临床疗效的影响,为优化 OVCF 的治疗方案提供更多依据。本研究存在一定局限性:一是样本量有限且随访周期较短,可能影响结果效度;二是仅对一位术者进行分析,结论不具有广泛推广性;三是未对患者骨质疏松的严重程度进行更精细的分层,可能对并发症的发生率及临床疗效造成混杂影响;四是回顾性研究存在选择偏倚风险;此外,本研究未系统评估患者个体差异 (如 BMD 梯度、骨折线偏侧性、终板完整性) 对学习曲线分析的干扰。例如,技术学习阶段若集中收治解剖复杂

度较高的病例 (如椎体后壁破损、椎弓根狭窄),可能会人为延长学习曲线的拐点出现时间。

综上,本研究通过 CUSUM 学习曲线分析发现,PVP 治疗 OVCF 的技术拐点位于第 43 例手术,此后术者逐渐趋于操作熟练。为进一步提升结论的可靠性,未来计划开展多中心队列研究,纳入不同年资术者 (如初级、中级、高级医师) 及对患者进行分层 (按 BMD 分级、Genant 分型、骨折线形态),采用混合效应模型分析术者经验与患者特征的交互作用。同时,可结合人工智能辅助的影像学分析 (如 CT 骨小梁三维重建、MRI 终板损伤评分),建立解剖复杂度的量化指标,用于术前风险分层和手术难度预测,从而进一步优化学习曲线的评估框架。

参考文献

- 1 Styrkarsdottir U, Stefansson OA, Gunnarsdottir K, et al. GWAS of bone size yields twelve loci that also affect height, BMD, osteoarthritis or fractures[J]. Nat Commun, 2019, 10(1): 2054. DOI: [10.1038/s41467-019-09860-0](https://doi.org/10.1038/s41467-019-09860-0).
- 2 Ji X, Xu F, Dong G, et al. Loading necrostatin-1 composite bone cement inhibits necroptosis of bone tissue in rabbit[J]. Regen Biomater, 2019, 6(2): 113-119. DOI: [10.1093/rb/rbz004](https://doi.org/10.1093/rb/rbz004).
- 3 Beall DP, Chambers MR, Thomas S, et al. Prospective and multicenter evaluation of outcomes for quality of life and activities of daily living for balloon kyphoplasty in the treatment of vertebral compression fractures: the EVOLVE trial[J]. Neurosurgery, 2019, 84(1): 169-178. DOI: [10.1093/neuros/nyy017](https://doi.org/10.1093/neuros/nyy017).
- 4 Jun DS, An BK, Yu CH, et al. Practical use of bone scan in patients with an osteoporotic vertebral compression fracture[J]. J Korean Med Sci, 2015, 30(2): 194-198. DOI: [10.3346/jkms.2015.30.2.194](https://doi.org/10.3346/jkms.2015.30.2.194).
- 5 Fei WY, Huo Q, Zhao PQ, et al. Magnolol prevents ovariectomy-induced bone loss by suppressing osteoclastogenesis via inhibition of the nuclear factor- κ B and mitogen-activated protein kinase pathways[J]. Int J Mol Med, 2019, 43(4): 1669-1678. DOI: [10.3892/ijmm.2019.4099](https://doi.org/10.3892/ijmm.2019.4099).
- 6 Frei AN, Gellad WF, Wertli MM, et al. Trends and regional variation in vertebroplasty and kyphoplasty in Switzerland: a population-based small area analysis[J]. Osteoporos Int, 2021, 32(12): 2515-2524. DOI: [10.1007/s00198-021-06026-x](https://doi.org/10.1007/s00198-021-06026-x).
- 7 Gómez-Hernández MT, Fuentes MG, Novoa NM, et al. The robotic surgery learning curve of a surgeon experienced in video-assisted thoracoscopic surgery compared with his own video-assisted thoracoscopic surgery learning curve for anatomical lung resections[J]. Eur J Cardiothorac Surg, 2022, 61(2): 289-296. DOI: [10.1093/ejcts/ezab385](https://doi.org/10.1093/ejcts/ezab385).
- 8 Cheng Y, Cheng X, Wu H. Risk factors of new vertebral compression fracture after percutaneous vertebroplasty or

- percutaneous kyphoplasty[J]. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 2022, 13: 964578. DOI: [10.3389/fendo.2022.964578](https://doi.org/10.3389/fendo.2022.964578).
- 9 Li W, Wang J, Liu W, et al. Machine learning applications for the prediction of bone cement leakage in percutaneous vertebroplasty[J]. *Front Public Health*, 2021, 9: 812023. DOI: [10.3389/fpubh.2021.812023](https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.812023).
- 10 Feng F, Chen M, Wang X, et al. Translation of a spinal bone cement product from bench to bedside[J]. *Bioact Mater*, 2021, 10: 345–354. DOI: [10.1016/j.bioactmat.2021.08.011](https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.08.011).
- 11 Dai H, Liu Y, Han Q, et al. Biomechanical comparison between unilateral and bilateral percutaneous vertebroplasty for osteoporotic vertebral compression fractures: a finite element analysis[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2022, 10: 978917. DOI: [10.3389/fbioe.2022.978917](https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.978917).
- 12 Park JS, Kim J, Lee Y, et al. Intra-cardiac embolism of a large bone cement material after percutaneous vertebroplasty removed through a combination of an endovascular procedure and an inferior vena cava exploration: a case report[J]. *J Korean Med Sci*, 2018, 33(19): e141. DOI: [10.3346/jkms.2018.33.e141](https://doi.org/10.3346/jkms.2018.33.e141).
- 13 Dong ST, Zhu J, Yang H, et al. Development and internal validation of supervised machine learning algorithm for predicting the risk of recollapse following minimally invasive kyphoplasty in osteoporotic vertebral compression fractures[J]. *Front Public Health*, 2022, 10: 874672. DOI: [10.3389/fpubh.2022.874672](https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.874672).
- 14 Vendevre T, Koneazny C, Br è que C, et al. Contribution of minimally invasive bone augmentation with PMMA cement in primary fixation of schatzker type II tibial plateau fractures[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2022, 10: 840052. DOI: [10.3389/fbioe.2022.840052](https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.840052).
- 15 He CJ, Liu GD. Comparison of the efficacy and safety of bone-filling mesh container and simple percutaneous balloon kyphoplasty in the treatment of osteoporotic vertebral compression fractures[J]. *Pain Physician*, 2018, 21(3): 259–268. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29871370/>
- 16 Clark W, Bird P, Gonski P, et al. Safety and efficacy of vertebroplasty for acute painful osteoporotic fractures (VAPOUR): a multicentre, randomised, double-blind, placebo-controlled trial[J]. *Lancet*, 2016, 388(10052): 1408–1416. DOI: [10.1016/S0140-6736\(16\)31341-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)31341-1).
- 17 Cheng X, Long HQ, Xu JH, et al. Comparison of unilateral versus bilateral percutaneous kyphoplasty for the treatment of patients with osteoporosis vertebral compression fracture (OVCF): a systematic review and meta-analysis[J]. *Eur Spine J*, 2016, 25(11): 3439–3449. DOI: [10.1007/s00586-016-4395-6](https://doi.org/10.1007/s00586-016-4395-6).
- 18 Yu K, Liang B, Zheng Y, et al. PMMA-Fe₃O₄ for internal mechanical support and magnetic thermal ablation of bone tumors[J]. *Theranostics*, 2019, 9(14): 4192–4207. DOI: [10.7150/thno.34157](https://doi.org/10.7150/thno.34157).
- 19 Chevalier Y, Pahr D, Charlebois M, et al. Cement distribution, volume, and compliance in vertebroplasty: some answers from an anatomy-based nonlinear finite element study[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2008, 33(16): 1722–1730. DOI: [10.1097/BRS.0b013e31817c750b](https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e31817c750b).
- 20 Yuan L, Bai J, Geng C, et al. Comparison of targeted percutaneous vertebroplasty and traditional percutaneous vertebroplasty for the treatment of osteoporotic vertebral compression fractures in the elderly[J]. *J Orthop Surg Res*, 2020, 15(1): 359. DOI: [10.1186/s13018-020-01875-4](https://doi.org/10.1186/s13018-020-01875-4).
- 21 Rice MK, Hodges JC, Bellon J, et al. Association of mentorship and a formal robotic proficiency skills curriculum with subsequent generations' learning curve and safety for robotic pancreaticoduodenectomy[J]. *JAMA Surg*, 2020, 155(7): 607–615. DOI: [10.1001/jamasurg.2020.1040](https://doi.org/10.1001/jamasurg.2020.1040).
- 22 Keshishian A, Boytsov N, Burge R, et al. Examining the treatment gap and risk of subsequent fractures among females with a fragility fracture in the US Medicare population[J]. *Osteoporos Int*, 2017, 28(8): 2485–2494. DOI: [10.1007/s00198-017-4072-6](https://doi.org/10.1007/s00198-017-4072-6).
- 23 Johansson L, Svensson HK, Karlsson J, et al. Decreased physical health-related quality of life—a persisting state for older women with clinical vertebral fracture[J]. *Osteoporos Int*, 2019, 30(10): 1961–1971. DOI: [10.1007/s00198-019-05044-0](https://doi.org/10.1007/s00198-019-05044-0).

收稿日期: 2025 年 03 月 14 日 修回日期: 2025 年 09 月 04 日
本文编辑: 张 苗 黄 笛

引用本文: 展冬冬, 张笑然, 张路通, 等. 经皮穿刺椎体成形术治疗骨质疏松椎体压缩性骨折的学习曲线及临床疗效分析[J]. 数理医药学杂志, 2025, 38(11): 839–845. DOI: 10.12173/j.issn.1004-4337.202503054.
Zhan DD, Zhang XR, Zhang LT, et al. Analysis of learning curve and clinical efficacy of percutaneous vertebroplasty for osteoporotic vertebral compression fracture[J]. *Journal of Mathematical Medicine*, 2025, 38(11): 839–845. DOI: 10.12173/j.issn.1004-4337.202503054.