

# 机器人辅助下椎体成形术治疗骨质疏松性椎体骨折有效性及安全性的 meta 分析

余熙荣<sup>1</sup> 钟远鸣<sup>2\*</sup> 莫泳皓<sup>1</sup> 马楚杰<sup>1</sup> 王子桓<sup>1</sup> 陆楷成<sup>3</sup>

1. 广西中医药大学 广西南宁 530001

2. 广西中医药大学第一附属医院 广西南宁 530023

3. 灵山县中医医院 广西钦州灵山县 535400

**摘要:** 比较机器人辅助椎体成形术与传统透视下椎体成形术治疗骨质疏松性椎体骨折的疗效与安全性。方法: 检索知网、万方、维普、CBM、Embase、Pubmed 等数据库从建库至 2023 年 9 月关于机器人辅助椎体成形术与传统透视下椎体成形术治疗骨质疏松性椎体骨折的对比研究, 提取相关数据采用 Revman 5.3 软件进行 meta 分析。结果: 共纳入 15 篇文献, 其中随机对照试验 4 篇, 队列研究 11 篇。两组在手术时间 ( $P=0.01$ )、住院时间 ( $P=0.003$ )、术中 X 线透视次数 ( $P<0.00001$ )、骨水泥注入量 ( $P=0.005$ )、Cobb 角 ( $P<0.00001$ ) 及术后并发症发生率 ( $P<0.00001$ ) 等方面差异有统计学意义。而在术后 VAS 评分及术后 ODI 评分方面差异无统计学意义。结论: 两者疗效相当, 但机器人辅助椎体成形术可缩短手术以及住院时间, 减少术中透视次数, 且安全性更高。

**关键词:** 机器人; 椎体成形术; 骨质疏松; 椎体骨折; Meta 分析

经皮椎体成形术及经皮椎体后凸成形术是临床治疗骨质疏松性椎体骨折的主要手段, 可以快速缓解疼痛, 防止伤椎高度进一步丢失, 并有助于纠正后凸<sup>[1]</sup>。穿刺损伤、骨水泥渗漏、术后伤椎塌陷、邻椎再骨折和医源性辐射等是 PVP/PKP 常见并发症, 会导致术后康复时间延长、腰痛不缓解甚至瘫痪, 严重者危及生命<sup>[2,3]</sup>。安全、快速、准确的进行穿刺及注射骨水泥是保证手术疗效, 减少并发症的关键。近年来, 机器人技术快速发展, 机器人辅助手术在脊柱外科中的应用逐渐增加。已有相关研究表明机器人辅助椎弓根置钉手术可提高置钉准确率及安全性<sup>[4]</sup>, 然而临床对于其在 PVP/PKP 中能否有同等甚至更好的效果尚无统一论。本文通过 meta 分析的方法, 比较机器人辅助与传统透视下行 PVP/PKP 的有效性 & 安全性, 以期为临床应用提供参考。

## 1. 资料与方法

### 1.1 文献检索

由 2 名成员检索中国知网、维普、万方、Pubmed、EMBASE、Cochrane 等数据库, 中文检索词包括: 机器人辅助、椎体成形术、骨质疏松性椎体压缩骨折、脊柱骨折

等<sup>[1]</sup>, 英文检索词包括: Robot-assisted、Robotics、Robot、Vertebroplasty、PVP、PKP、osteoporotic vertebral compression fracture、spinal fracture 等。检索时间为自建库到 2023 年 9 月 30 日。

### 1.2 纳入标准与排除标准

纳入标准: (1) 本次研究选取的对象是患有胸腰椎骨质疏松引发的椎体压缩性骨折病例<sup>[2]</sup>。(2) 所采取的研究方法是随机对照试验或序列研究<sup>[2]</sup>。(3) 具体干预手段: 实验组实施机器人辅助的穿刺操作, 而对照组则采用常规透视指导下的手工穿刺<sup>[2]</sup>。(4) 评价指标至少需涵盖以下项目中的任意一个: 手术持续时间、术中透视次数、住院期限、注入的骨水泥量、术后 Cobb 角变化、术后腰部疼痛 VAS 评分、术后 ODI 指数、并发症的出现率<sup>[2]</sup>。排除标准: (1) 合并病理性骨折、脊髓损伤及其他重大疾病。(2) 无法获得全文、综述、病案报道及系统评价等。(3) 无对照组。(4) 非中文或英文的文献。

### 1.3 文献筛选与数据提取

由 2 名成员独立进行, 使用 Note Express 软件对文献进

行筛选，剔除重复文献后通过阅读标题、摘要及全文后，最终确定纳入文献，如遇分歧由第三方裁定。提取数据包括：手术时间、术中透视次数、住院天数、骨水泥注入量、术后 Cobb 角、术后腰痛 VAS 评分、术后 ODI、并发症发生率<sup>[2]</sup>。

#### 1.4 纳入文献质量评价

在本研究中，文章的质量评估采用纽卡斯尔-渥太华评分体系 (NOS)<sup>[3]</sup>。该体系针对研究对象的筛选、各组间的对比性以及结果测量的准确性设置了一系列评估标准，总评分为 9 分<sup>[3]</sup>。评分达到 7 分及以上者被认定为高品质研究，5 至 6 分者属于中等品质，而低于 5 分则被视为低品质研究<sup>[3]</sup>。至于随机对照试验的质量评定，则是依照 Cochrane 评价手册 (版本 5.1.0) 的相关准则执行，涵盖随机分组序列的生成、盲法的执行、分配隐蔽性、数据完整性和潜在偏倚等多个维度<sup>[3]</sup>。完全符合这些标准的试验被评为 A 级 (偏倚风险较低)，部分符合者为 B 级 (偏倚风险中等)，而未能满足标准的试验则被归为 C 级 (偏倚风险较高)<sup>[3]</sup>。

#### 1.5 统计学处理

采用 RevMan 5.3 软件进行数据分析作业<sup>[4]</sup>。针对各项研究开展异质性评估，若 P 值不高于 0.1 且 I<sup>2</sup> 值小于 50%，则认为研究间不存在显著异质性，此时选用固定效应模型进行分析；反之，若 P 值高于 0.1 且 I<sup>2</sup> 值大于等于 50%，则表明研究间存在异质性，采用随机效应模型进行分析<sup>[4]</sup>。对于二分类变量，使用 OR 值作为主要的统计指标；而对于连续型变量，则选用加权平均差 (mean difference, MD) 作为统计量<sup>[4]</sup>。对于那些包含文献数量较少、数据覆盖不全的研究指标，采用叙述性分析<sup>[4]</sup>。通过漏斗图来检测

潜在的发表偏倚。此外，对于部分研究中的亚组数据，已经完成了相应的数据整合工作<sup>[4]</sup>。

## 2. 结果

### 2.1 文献筛选流程及结果

总共提取 679 篇文献，经过逐层筛选后，最终纳入 15 篇文献<sup>[5-19]</sup>。文献筛选过程及结果见图 1。

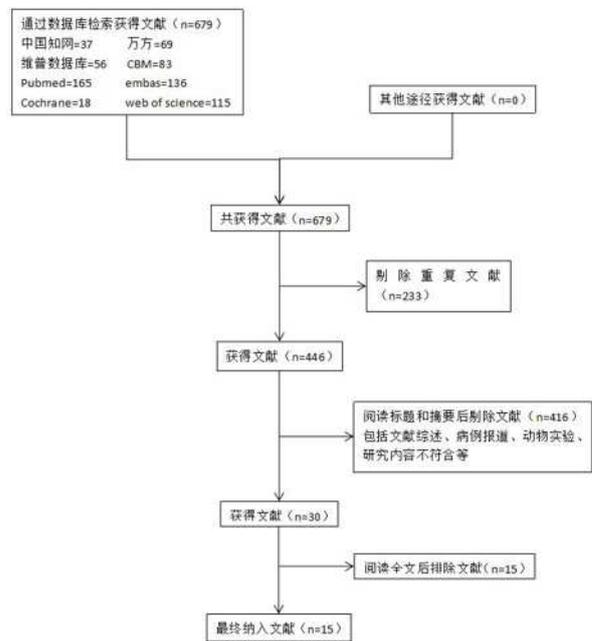


图 1 文献筛选流程图

### 2.2 纳入文献基本特征及质量评价结果

在所选的 15 篇文章中，有 11 篇属于队列研究<sup>[6-7,9-13,15-16,18-19]</sup>，另外 4 篇则是随机对照试验<sup>[5,8,14,17]</sup>。相关文献的特征和质量评估结果在图 2, 3, 4 中展示。

作者	研究类型	例数 (T/C, n)	年龄 (T/C, 岁)	性别(男/女, 例)		手术方式	随访时间	结局指标
				T	C			
张在田 2016 <sup>[6]</sup>	随机对照研究	40/40	61.10 ± 8.6/63.20 ± 5.9	16/24	12/28	机器人辅助 PVP/ 传统 PVP	NA	①②③④⑤⑥⑧
林书 2020 <sup>[6]</sup>	队列研究	33/30	68.80/67.90	12/21	11/19	机器人辅助 PKP/ 传统 PKP	12个月	③⑤⑥⑧
郭松 2021 <sup>[7]</sup>	队列研究	23/27	72.17 ± 7.02/72.15 ± 7.36	6/17	8/19	Mazor 机器人辅助 PVP 组/传统 PVP	3个月	①②③④⑦⑧
谢海清 2021 <sup>[6]</sup>	随机对照研究	95/85	75.20 ± 3.77/74.0 ± 2.8	43/52	39/46	“天机”机器人辅助 PVP 组/传统 PVP	1个月	①②④⑤⑥⑦⑧
郑博隆 2021 <sup>[9]</sup>	队列研究	19/21	73.40 ± 10.7/75.20 ± 11.2	5/14	6/15	“天机”机器人辅助 PVP 组/传统 PVP	8.3个月	①④⑥⑦⑧
Wang 2021 <sup>[10]</sup>	队列研究	30/30	69.50/70.00	14/16	13/17	Tirobot 机器人辅助 PVP/ 传统 PVP	NA	①③⑤⑥⑧
Shi 2021 <sup>[11]</sup>	队列研究	14/16	71.00 ± 8.81/75.75 ± 5.93	4/10	7/9	ZOEZEN 机器人辅助 PVP/ 传统 PVP	3个月	①⑥⑦
杨楠 2022 <sup>[12]</sup>	队列研究	40/50	69.30 ± 9.0/71.00 ± 7.5	18/22	22/28	机器人辅助 PVP/ 传统 PVP	NA	①③⑥⑦⑧
林书 2022 <sup>[13]</sup>	队列研究	87/68	71.70/69.60	19/68	15/53	改良机器人辅助 PKP/ 传统 PKP	1个月	④⑤⑥⑧
孙韬 2022 <sup>[14]</sup>	随机对照研究	12/12	64.22 ± 5.70/65.07 ± 4.91	5/7	6/6	改良机器人辅助 PKP/ 传统 PKP	NA	①②④⑤⑥⑧
Jin 2022 <sup>[15]</sup>	队列研究	81/131	75.44 ± 8.25/72.65 ± 9.14	36/45	59/72	Tirobot 机器人辅助 PKP/ 传统 PKP	6.87 ± 1.55/ 7.04 ± 2.61	①②⑥⑦⑧
Li 2022 <sup>[16]</sup>	队列研究	15/15	69.70 ± 8.1 / 69.30 ± 8.4	2/13	3/12	Tirobot 机器人辅助 PKP/ 传统 PKP	3个月	①④⑥⑧
杨毅 2022 <sup>[17]</sup>	随机对照研究	18/16	64.20 ± 4.7/65.40 ± 4.0	8/7	7/8	佐航 100 机器人辅助 PKP/ 传统 PKP	NA	③⑧
马铭志 2023 <sup>[18]</sup>	队列研究	40/45	75.2 ± 8.8/75.5 ± 8.9	11/29	13/32	“天机”机器人辅助 PKP 组/传统 PKP	12个月	①②③④⑤⑦⑧
Bettag 2023 <sup>[19]</sup>	队列研究	70/24	72.81 ± 9.49/72.58 ± 12.22	20/50	8/16	机器人辅助 PKP/ 传统 PKP	NA	④⑧

注：①手术时间②住院时间③术中 X 线次数④骨水泥用量⑤术后 Cobb 角⑥ VAS 评分⑦ ODI 评分⑧术后并发症发生率

图 2 纳入文献主要特征

纳入研究	NOS 评分									总分
	研究人群选择				组间可比性		结果			
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	
林书 2020	★	★	★	-	★	★	★	★	★	8
郭松 2021	★	★	★	-	★	★	★	★	★	8
郑博隆 2021	★	★	★	-	★	★	★	★	★	8
Wang 2021	★	★	★	-	★	★	★	-	★	7
Shi 2021	★	★	★	-	★	★	★	★	★	8
杨楠 2022	★	★	★	-	★	★	★	-	★	7
林书 2022	★	★	★	-	★	★	★	★	★	8
Jin 2022	★	★	★	-	★	★	★	★	-	7
Li 2022	★	★	★	-	★	★	★	★	★	8
马铭志 2023	★	★	★	-	★	★	★	★	★	8
Bettag 2023	★	★	★	-	★	★	★	-	★	

条目：(1)实验组的代表性；(2)对照组的选取；(3)干预措施的确定；(4)确定研究起始时间时无需要研究的结局指标；(5)(6)设计和统计分析时暴露组与非暴露组间的可比性；(7)研究对于结果的评价是否充分；(8)随访时间是否足够长；(9)随访是否足够充分；

图 3 纳入队列研究质量评价结果

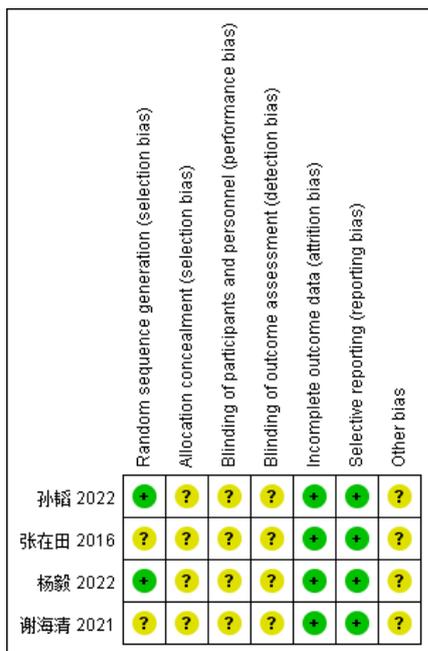
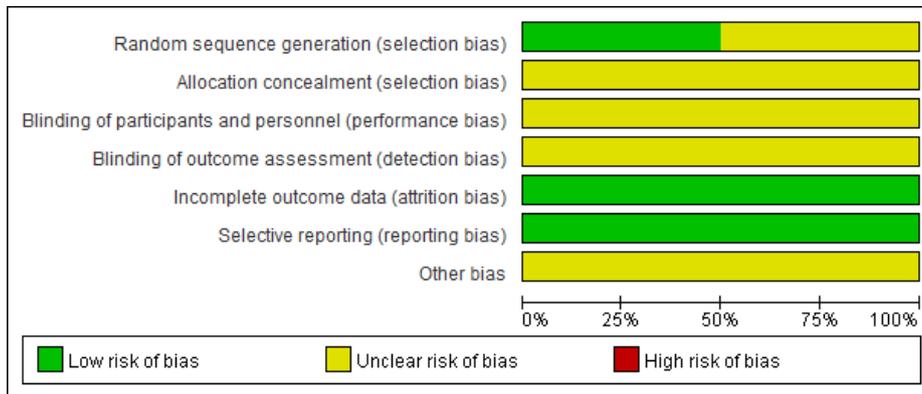


图4 纳入随机对照试验质量评价结果

## 2.3 Meta 分析结果

### 2.3.1 各组手术时间差异

纳入研究的文献中有 11 篇报道了手术时间<sup>[5, 7-12, 14-16, 18]</sup>。由于各项研究之间表现出高度的异质性 ( $I^2=99%$ )，因此我们采用了随机效应模型进行 Meta 分析<sup>[2]</sup>。分析结果指出：机器人辅助的椎体成形手术在手术时间上显著少于传统透视手术组，差异具有统计学意义 ( $MD=-7.95$ ,  $95\%CI: -14.01$  至  $-1.88$ ,  $P < 0.05$ )，具体数据见图 5<sup>[2]</sup>。

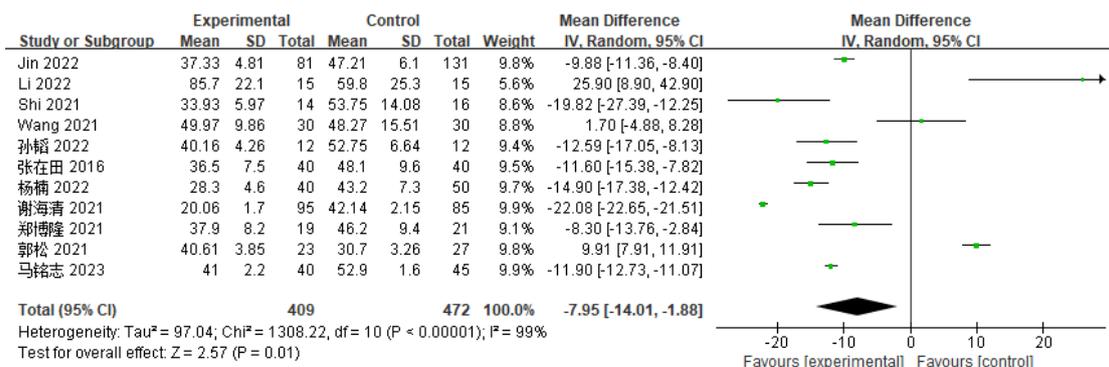


图5 两组手术时间比较的 meta 分析森林图

### 2.3.2 各组住院时间差异

在参与本次研究的文献资料中，有 5 篇文章提及了患

者住院时长<sup>[5,7-8,15,18]</sup>。由于不同研究之间表现出较高的异质性 ( $I^2$  值为  $69%$ )，因此本研究采用了随机效应模型的元

分析方法<sup>[2]</sup>。分析结果揭示，采用机器人辅助的椎体成形手术在住院时间上显著少于传统透视手术组，差异具有统计学

意义（MD=-0.52，95%CI：-0.86至-0.18，P < 0.05），具体分布见图6<sup>[2]</sup>。

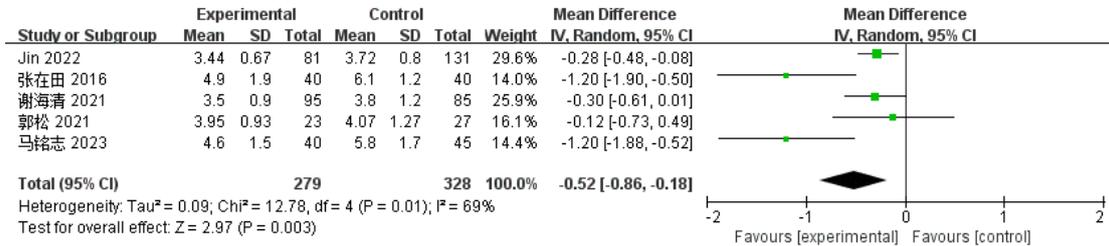


图6 两组住院时间比较的 meta 分析森林图

### 2.3.3 各组术中 X 次数差异

此外，研究文献中有 8 篇涉及了手术过程中 X 射线的使用次数<sup>[5-7,10,12,14,17,19]</sup>。鉴于研究间的异质性较大（I<sup>2</sup> 值为 99%），同样应用了随机效应模型进行元分析。分析结果表

明，机器人辅助椎体成形手术在手术过程中使用 X 射线的次数显著低于传统透视手术组，差异具有极高度统计学意义（MD=-14.46，95%CI：-19.93至-8.98，P < 0.00001），详见图7<sup>[2]</sup>。

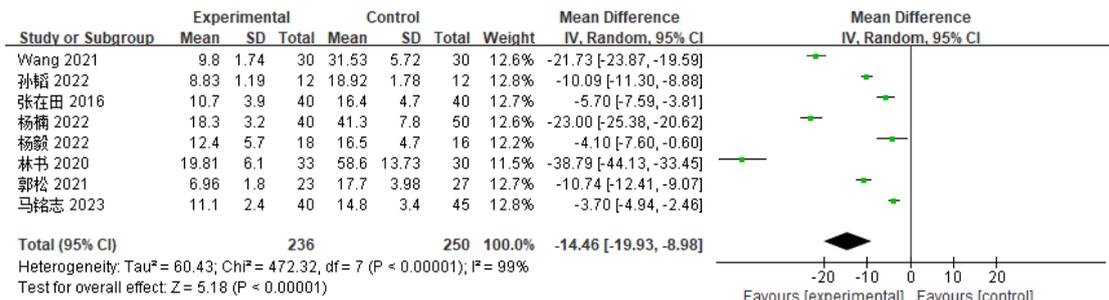


图7 两组术中 X 次数比较的 meta 分析森林图

### 2.3.4 各组骨水泥注入量差异

在整合的学术资料中，8 项研究提及了骨水泥的填充量<sup>[5,8-9,13-14,16,18,19]</sup>。由于各项研究显示出较高的异质性（I<sup>2</sup>=84%），因此采用了随机效应模型的元分析<sup>[2]</sup>。分析

结果表明，在进行机器人辅助的椎体成形手术中，骨水泥的使用量显著低于采用传统透视技术的组别，差异具有统计学意义（MD=-0.68，95%CI：-1.15至-0.21，P < 0.01），具体分布见图8<sup>[2]</sup>。

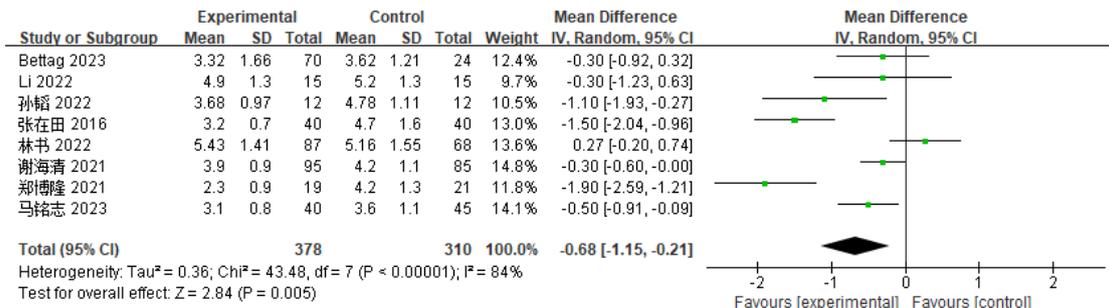


图8 两组骨水泥注入量比较的 meta 分析森林图

### 2.3.5 各组术后伤椎 Cobb 角差异

在纳入的 7 篇文献中，涉及到术后伤椎的 Cobb 角变化

<sup>[5-6,8,10,13-14,19]</sup>。这些研究的同质性较高（I<sup>2</sup>=9%），因此适用固定效应模型进行元分析<sup>[2]</sup>。分析结论表明，机器人辅助椎

体成形手术后，伤椎的 Cobb 角显著低于传统透视手术组，至  $-0.55$ ， $P < 0.00001$ ），详细数据见图 9<sup>[2]</sup>。差异具有极高度的统计学意义（ $MD=-0.83$ ， $95\%CI: -1.12$

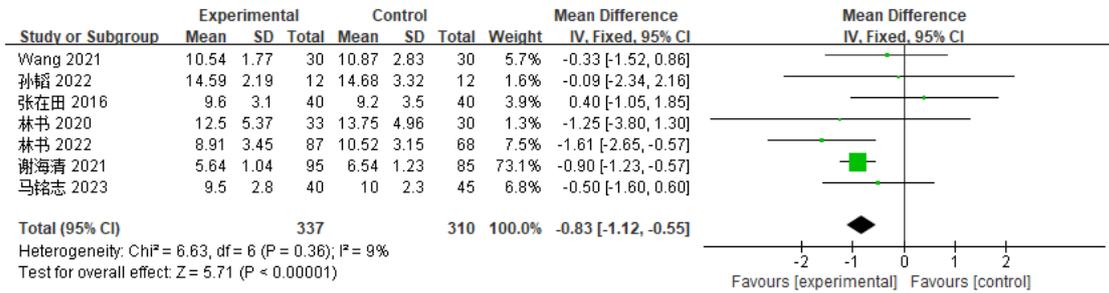


图 9 两组术后伤椎 Cobb 角比较的 meta 分析森林图

### 2.3.6 各组术后 VAS 评分改善程度差异

在参与本研究的文献资料中，12 篇文章提及了手术后患者 VAS 评分的变化情况<sup>[5-16]</sup>。由于各研究之间呈现出明显的异质性 ( $I^2=72\%$ )，因此采用了随机效应模型进行 Meta

分析<sup>[2]</sup>。分析结果指出，两组患者在术后的 VAS 评分提升幅度上并无统计学上的显著差异 ( $MD=-0.10$ ， $95\%CI: -0.25$  至  $0.06$ ， $P > 0.05$ )，具体分布见图 10<sup>[2]</sup>。

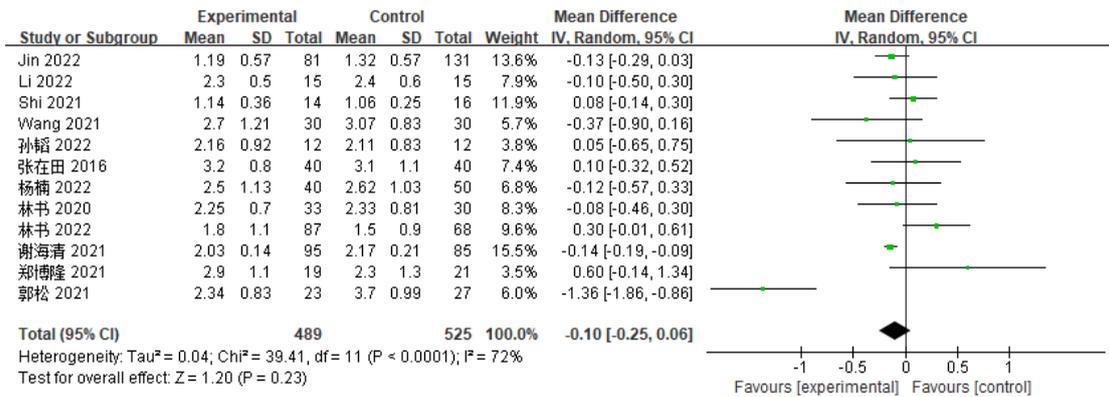


图 10 两组术后 VAS 评分改善程度比较的 meta 分析森林图

### 2.3.7 各组术后 ODI 评分改善程度差异

在纳入分析的文献中，有 7 篇文章记录了术后 ODI 评分的数据<sup>[7-9,11-12,15,19]</sup>。这些研究之间未显示出异质性 ( $I^2=0\%$ )，因此采用了固定效应模型进行 Meta 分析<sup>[2]</sup>。分

析结果表明，两组患者在术后 ODI 评分的改善上同样没有统计学上的显著差异 ( $MD=-0.29$ ， $95\%CI: -0.67$  至  $0.10$ ， $P > 0.05$ )，详见图 11<sup>[2]</sup>。

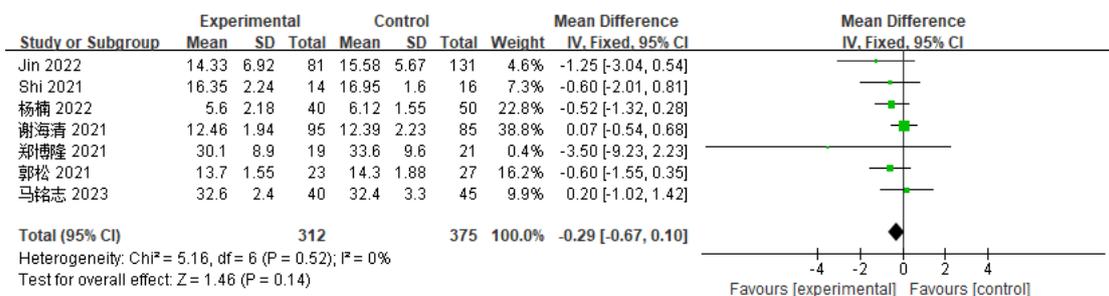


图 11 两组术后 ODI 评分改善程度比较的 meta 分析森林图

### 2.3.8 各组并发症发生率差异

在参与分析的文献资料中，14 篇文章提及了并发症出

现的频率<sup>[5-10,12-19]</sup>。研究之间不存在显著异质性 ( $I^2=0\%$ )，因此，本研究采纳了固定效应模型进行 Meta 分析<sup>[2]</sup>。分析

结果揭示：采用机器人辅助的椎体成形手术并发症发生率较传统透视手术组显著减少，差异具备统计学意义（MD=0.30，95%CI: 0.21 至 0.42,  $P < 0.00001$ ），具体分布见图 12<sup>[2]</sup>。

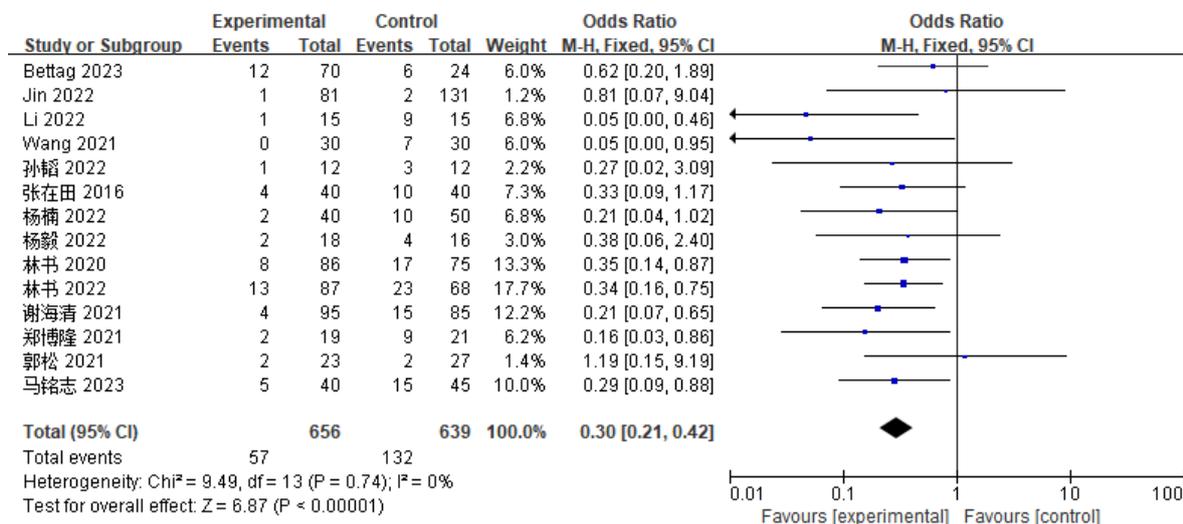


图 12 两组并发症发生率的 meta 分析森林图

#### 2.4 发表偏倚分析

以并发症发生率为例进行发表偏倚检验，结果显示，漏斗图中各研究分布对称性良好，提示存在发表偏倚可能性较低，见图 13。

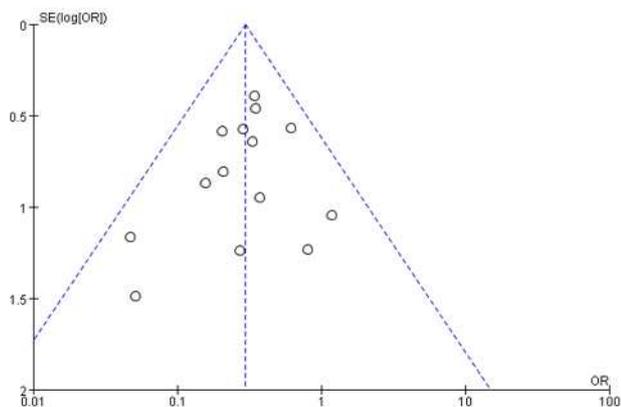


图 13 文献发表偏倚漏斗图

### 3. 讨论

骨质疏松性椎体压缩性骨折 (osteoporotic vertebral compression fractures, OVCF) 是以椎体骨质疏松病变为基础，受到轻微外伤就会引发的常见骨科疾病，因患者多为老年人，OVCF 的治疗一直是脊柱外科的热点和难点<sup>[20]</sup>。重度骨质疏松症的患者如采取保守治疗，骨量会因卧床、活动减少等原因进一步丢失，愈合困难，再骨折风险增加。其次，该

类患者骨骼变得多孔和脆弱，用传统切开复位内固定的方法往往面临内固定稳定性差及失败率高的问题，且对患者本身创伤较大，治疗效果非常有限<sup>[21]</sup>。

随着现代医疗技术的进步以及微创时代的到来，经皮椎体成形术 PVP 及经皮椎体后凸成形术 PKP 已成为 OVCF 的主要治疗方式，诸多研究证实 PVP/PKP 不仅疗效满意，还具有可靠的固定强度，能够给椎体提供良好的稳定性<sup>[22-24]</sup>。然而传统透视下徒手穿刺十分依赖术者的能力，即使是经验丰富的医生，仍需要多次反复穿刺才能保证穿刺针处于理想位置，这不可避免的造成不必要的软组织损伤及骨质破坏，甚至伤及神经血管。此外，多次透视对医患双方身体健康的影响也不可忽视，增加了癌症、放射性白内障及后代畸形等的发生风险。骨科手术机器人的出现则为临床治疗提供了一种新思路，其可通过术前术中影像资料和数据自动确定最佳穿刺路径，有精度高、损伤少、疗效好等优势。已有不少学者通过研究证实了骨科手术机器人在辅助椎弓根置钉方面有显著疗效，在提高置钉精度的同时可降低并发症的发生率<sup>[25-27]</sup>。然而关于机器人辅助 PVP/PKP 疗效及安全性尚未完全确定。

本次 meta 分析结果显示机器人辅助穿刺可缩短手术时间与住院时间。但纳入的所有研究中手术时间都未根据手术节段数进行组分析。袁伟、邢宝瑞等人<sup>[28-29]</sup>将单双节段

分组后研究发现单节段手术中传统透视组手术时间短于机器人辅助组,在双节段手术中手术时间无明显差异。这可能是由于机器人系统一般需要20分钟左右的准备时间,这在单节段手术中会占用大量时间,但是安装后一次扫描就可以完成双节段甚至以上的定位穿刺,而传统透视下徒手穿刺则会因反复调整不得不增加手术时间。此外,手术时间也与术者对机器人的熟悉程度和手术熟练度相关。总之机器人辅助手术总体手术时间较短,在治疗多节段OVCF时更有优势。

骨科手术中如何降低辐射对身体的伤害越来越受关注。本次meta分析结果显示机器人辅助组术中X次数显著少于传统透视组,由于机器人辅助手术只需按照术前规划进行穿刺定位,术中视情况行少量调整,不需要使用C臂多次透视反复调整,减少了术中医患双方的辐射伤害。但是患者术前需另外行三维成像收集数据,这可能会增加患者的辐射暴露。

此次研究还发现,机器人辅助组在改善伤椎Cobb角、骨水泥注入量、并发症发生率方面优于传统透视组,但术后VAS及ODI评分无明显差别。因为机器人辅助组穿刺位置更佳,仅需少量骨水泥就可达到理想弥散状态,因此在改善cobb角,防止骨水泥渗漏中更具优势。两种方式术后VAS及ODI评分无统计学差异,说明机器人辅助手术具有与传统透视组相似的临床疗效,与既往研究一致。

综上所述,机器人辅助椎体成形术具有良好的疗效及安全性,有广阔的应用前景。考虑到机器人辅助技术额外的费用、复杂的操作步骤以及一定的学习曲线,具体的临床应用还须遵循个体化治疗原则。

本研究有以下不足:(1)随机对照试验较少,证据等级不高。(2)大部分指标异质性较高,可能是机器人型号、机器人系统熟练度及术者经验水平所致。(3)大部分研究随访时间较短,导致机器人辅助技术远期疗效的优势没体现出来。所以本次研究的结论尚需大样本、高质量RCT来予以论证。

#### 参考文献:

[1]周红云,许超.椎体成形术在骨质疏松性椎体压缩骨折中的应用进展[J].中国微创外科杂志,2019,19(07):645-648.

[2]王明远,高云,张帅等.骨质疏松性椎体压缩骨折PVP、PKP并发症防治的进展[J].颈腰痛杂志,2022,43(03):434-436.

[3]Cavka M, Delimar D, Rezan R, Zigman T, Duric KS, Cimic M, Dumic-Cule I, Prutki M. Complications of Percutaneous Vertebroplasty: A Pictorial Review. *Medicina (Kaunas)*. 2023 Aug 25;59(9):1536.

[4]Kochanski RB, Lombardi JM, Laratta JL, Lehman RA, O' Toole JE. Image-Guided Navigation and Robotics in Spine Surgery. *Neurosurgery*. 2019 Jun 1;84(6):1179-1189.

[5]张在田,张绪华,卫志华等.机器人辅助与手工单侧穿刺椎体成形术治疗骨质疏松性骨折的疗效比较[J].中国现代医生,2018,56(27):84-87.

[6]林书,胡珏,万仑等.机器人辅助经皮椎体后凸成形术治疗多节段骨质疏松性椎体压缩性骨折[J].中国修复重建外科杂志,2020,34(09):1136-1141.

[7]郭松,付强,杭栋华等.Mazor脊柱机器人辅助改良经皮椎体成形术治疗腰椎骨质疏松性骨折的疗效分析[J].中国脊柱脊髓杂志,2021,31(09):818-824.

[8]谢海清,李贤坤,孙进等.骨科机器人辅助与传统透视下经皮椎体成形术治疗骨质疏松性椎体压缩性骨折的比较[J].广东医学,2021,42(09):1102-1106.

[9]郑博隆,郝定均,林斌,等.“天玑”骨科手术机器人辅助与徒手穿刺椎体成形术治疗上胸椎骨质疏松性椎体压缩骨折的疗效比较[J].中华创伤骨科杂志,2021,23(1):20-26.

[10]Wang B, Cao J, Chang J, Yin G, Cai W, Li Q, Huang Z, Yu L, Cao X. Effectiveness of Tirobot-assisted vertebroplasty in treating thoracolumbar osteoporotic compression fracture. *J Orthop Surg Res*. 2021 Jan 19;16(1):65.

[11]Shi B, Hu L, du H, Zhang J, Zhao W, Zhang L. Robot-assisted percutaneous vertebroplasty under local anaesthesia for osteoporotic vertebral compression fractures: a retrospective, clinical, non-randomized, controlled study. *Int J Med Robot*. 2021 Jun;17(3):e2216.

[12]杨楠,王胜宝,刘双福等.机器人辅助经皮穿刺椎体成形术治疗老年骨质疏松性椎体压缩骨折的疗效分析[J].华西医学,2022,37(10):1471-1475.

[13]林书,谭科,胡珏等.改良骨科机器人辅助椎体后凸成形术治疗骨质疏松性椎体压缩骨折疗效分析[J].中国修复重建外科杂志,2022,36(09):1119-1125.

[14]孙韬,张元智,胡旭锋等.双平面定位机器人辅助

PKP 治疗骨质疏松性椎体压缩性骨折的可行性分析 [J]. 生物骨科材料与临床研究, 2022, 19(03): 27-31.

[15] Jin M, Ge M, Lei L, Li F, Wu M, Zhang G, Pei S, Zheng B. Clinical and Radiologic Outcomes of Robot-Assisted Kyphoplasty versus Fluoroscopy-Assisted Kyphoplasty in the Treatment of Osteoporotic Vertebral Compression Fractures: A Retrospective Comparative Study. *World Neurosurg.* 2022 Feb; 158:e1-e9.

[16] Li Q, Wu C, Huang Z, Cao J, Chang J, Yin G, Yu L, Cao X, Sui T. A comparison of robot-assisted and fluoroscopy-assisted kyphoplasty in the treatment of multi-segmental osteoporotic vertebral compression fractures. *J Biomed Res.* 2022 May 10; 36(3): 208-214.

[17] 杨毅, 地力牙尔·莫合塔尔, 彭理斌, 等. 机器人辅助经皮椎体后凸成形术在胸腰椎压缩性骨折治疗中的应用 [J]. 中华解剖与临床杂志, 2022, 27(12): 810-816.

[18] 马铭志, 王志聪, 叶佳徽等. “天玑”骨科机器人辅助与徒手经椎弓根行椎体后凸成形术治疗胸椎骨质疏松性椎体压缩骨折的疗效分析 [J]. 中国修复重建外科杂志, 2023, 37(09): 1106-1112.

[19] Bettag C, Jann T, Rohde V, Fiss I, Schatlo B, von der Brelie C. Robot-assisted spinal augmentation procedures: is it worth the increased effort? *Eur Spine J.* 2023 Jun 13.

[20] 程海霞, 韩二环, 张川等. 骨质疏松性骨折病例特征及术后预后影响因素研究 [J]. 华南预防医学, 2023, 49(06): 714-717+723.

[21] Li J, Xu L, Liu Y, Sun Z, Wang Y, Yu M, Li W, Zeng Y. Open Surgical Treatments of Osteoporotic Vertebral Compression Fractures. *Orthop Surg.* 2023 Aug 16.

[22] 曹玉举, 许建文. 经皮椎体成形术和椎体后凸成形术治疗骨质疏松性椎体压缩性骨折研究进展 [J]. 中国中医骨

伤科杂志, 2015, 23(09): 72-76.

[23] 贾璞, 唐海. 骨水泥强化术后椎体再骨折的相关因素研究进展 [J]. 中华骨质疏松和骨矿盐疾病杂志, 2013, 6(01): 83-88.

[24] 常小波, 王爱芳, 王勤业. 经皮椎体成形术治疗骨质疏松性胸腰椎压缩骨折的疗效及影响术后残余疼痛相关因素分析 [J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2023, 38(09): 957-960.

[25] 赵树雄, 王增平, 邹月超等. 机器人辅助与传统透视下椎弓根螺钉内固定术治疗胸腰椎骨折的荟萃分析 [J]. 脊柱外科杂志, 2023, 21(04): 263-274.

[26] 辛晓明, 高明暄, 张帆等. 骨科机器人辅助置钉在青少年特发性脊柱侧弯矫形中的应用 [J]. 中国组织工程研究, 2023, 27(36): 5790-5794.

[27] 刘毅, 赵志刚, 王昕等. 机器人辅助椎弓根钉固定治疗颈椎骨折脱位 [J]. 中国矫形外科杂志, 2022, 30(21): 1941-1946.

[28] 袁伟, 孟小童, 刘欣春等. 机器人辅助经皮椎体后凸成形术治疗单 / 双节段骨质疏松性椎体压缩骨折临床疗效 [J]. 中国修复重建外科杂志, 2021, 35(08): 1000-1006.

[29] 邢宝瑞, 侯秀秀, 崔梦倩, 等. 机器人辅助经皮椎体后凸成形术治疗单 / 双节段骨质疏松性椎体压缩骨折临床效果观察 [J]. 康颐, 2023(5): 100-102.

#### 作者简介:

余熙荣 (1994—), 男, 汉族, 陕西商洛, 本科, 广西中医药大学, 硕士研究生, 脊柱相关疾病的中医诊治研究

#### 基金项目:

基于 RhoA/ROCK 信号通路探讨“脊髓伤方”改善脊髓型颈椎病微环境以促进神经轴突再生的机制研究和 82260942, 2023.01, 广西中医药大学。