

· 临床研究 · doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2024.18.019

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20240626.1303.002\(2024-06-27\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20240626.1303.002(2024-06-27))

经皮髓核成形术对椎间盘源性腰痛患者椎间盘内压力的影响研究

刘 衡, 杨崇正, 吴志浩, 黄凯华, 王贯通, 吴佳璇, 孙 强[△]
(南京医科大学附属南京医院/南京市第一医院骨科, 南京 210006)

[摘要] **目的** 观察椎间盘源性腰痛(DLBP)患者经皮髓核成形术(PN)前后椎间盘内压力变化,探讨PN缓解DLBP的机制。**方法** 选取2023年6—10月该院骨科收治的确诊为DLBP痛行PN的患者30例,术前、术后即刻分别测量椎间盘内压力,并于术前及术后1 d、1个月、3个月应用视觉模拟评分法(VAS)、日本骨科学会评分法(JOA)及Oswestry功能障碍指数(ODI)评估患者疼痛水平,用改良MacNab标准评估手术疗效。采用线性相关分析观察椎间盘内压力与各疼痛评分变化间的关系,对可能影响术后临床疗效的因素进行多因素logistic回归分析。**结果** 与术前比较,患者术后即刻椎间盘内压力明显降低,术后1 d、1个月、3个月的JOA评分明显上升,VAS及ODI评分明显下降,差异有统计学意义($P<0.05$);术后1 d、1个月、3个月手术疗效的优良率分别是66.7%、73.3%、63.3%。术前与术后1 d椎间盘内压力差值、椎间盘内压力降低率与各疼痛评分变化值间无明显相关性($P>0.05$),多因素logistic回归分析显示病程、椎间盘内压力降低率为PN手术临床疗效的影响因素($P<0.05$)。**结论** DLBP的发生可能与椎间盘内压力增高有关,PN可以有效降低椎间盘内压力,达到缓解疼痛的目的。

[关键词] 椎间盘内压力;经皮髓核成形术;椎间盘源性腰痛

[中图法分类号] R826.64,R681.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2024)18-2820-06

Effect of percutaneous nucleoplasty on intradiscal internal pressure in patients with discogenic low back pain

LIU Heng, YANG Chongzheng, WU Zhihao, HUANG Kaihua,
WANG Guantong, WU Jiaxuan, SUN Qiang[△]

(Department of Orthopedics, Affiliated Nanjing Hospital of Nanjing Medical University/Nanjing First Hospital, Nanjing, Jiangsu 210006, China)

[Abstract] **Objective** To observe the changes in intradiscal internal pressure before and after percutaneous nucleoplasty (PN) in the patients with discogenic low back pain (DLBP), and to explore the mechanism of PN for alleviating DLBP. **Methods** Thirty patients definitely diagnosed as DLBP undergoing PN in the orthopedic department of this hospital from June 2023 to October 2023 were selected. The internal pressure of the lumbar disc was measured before and after the surgery. The visual analog scale (VAS), Japanese orthopedic association score (JOA) and Oswestry disability index (ODI) were used to assess the pain level of the patients before operation and at postoperative 1 d, 1 month, 3 months. The surgical efficacy was evaluated by using the modified MacNab criteria. The linear correlation analysis was used to observe the relationship between the internal pressure of lumbar disc and changes in each pain score, and the factors possibly affecting postoperative effect was analyzed by using the multivariate logistic regression analysis. **Results** Compared with before the surgery, the immediate postoperative internal pressure of lumbar disc in the patients was significantly decreased. The JOA scores at postoperative 1 d, 1 month and 3 months were significantly increased, while the VAS and ODI scores were significantly decreased, and the differences were statistically significant ($P<0.05$). The excellent rates of surgical efficacy at postoperative 1 d, 1 month and 3 months were 66.7%, 73.3% and 63.3%, respectively. The internal pressure of lumbar disc difference value between before operation and on postoperative 1 d and internal pressure of lumbar disc decrease rate had no significant correlation with the change value of each pain score ($P>0.05$). The multivariate logistic regression analysis showed that the disease duration and the decrease rate of internal pressure of lumbar disc were the influencing factors of clinical

efficacy in PN ($P < 0.05$). **Conclusion** The occurrence of DLBP may be related with the increase of internal pressure of lumbar disc. PN could effectively reduce internal pressure of lumbar disc and achieve the goal of pain relief.

[Key words] intradiscal internal pressure; percutaneous nucleoplasty; discogenic low back pain

随着生活和工作方式的改变,椎间盘源性腰痛(discogenic low back pain, DLBP)患者数量日益增多,且 DLBP 呈年轻化趋势。许多患者经过长期保守治疗后仍无法缓解症状,生活质量和工作效率受到严重影响。DLBP 的主要诱因包括椎间盘退行性病变和椎间盘内部结构紊乱等,发生机制包括机械压迫、炎症刺激和免疫反应等^[1]。近年来亦有研究表明椎间盘内压力升高是引起疼痛的因素之一^[2]。王沛等^[3]通过腰椎间盘测压技术提出腰椎间盘处于一种流体静压状态,并证实使用液体连通装置测量椎间盘内压力是可行的。测定椎间盘内压力简便、直观,有望成为评估疗效和指导手术进程的重要参数。经皮髓核成形术(percutaneous nucleoplasty, PN)作为当下治疗 DLBP 的主流手术之一,在临床上已取得较好的疗效,但目前仍缺乏关于人类活体状态下 PN 治疗 DLBP 对椎间盘内压力影响的研究。因此,本研究旨在观察 DLBP 患者接受 PN 前、后椎间盘内压力的变化,探讨 PN 治疗 DLBP 的机制。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取 2023 年 6—10 月于本院骨科收治的确诊为 DLBP 行 PN 的患者 30 例,其中男 13 例、女 17 例;年龄 27~55 岁,中位年龄 43.3 岁,病程 5 个月至 4 年,均为单节段手术;第 4/5 腰椎椎间盘退变 21 例,第 5 腰椎/第 1 骶椎椎间盘退变 7 例,第 3/4 腰椎椎间盘退变 2 例。目前关于 DLBP 的诊断尚未达成共识,认可度较高的诊断标准^[4-6]为:临床症状主要表现为反复发作的顽固性腰部疼痛,伴或不伴不超过膝盖范围的下肢疼痛,久坐、久站后症状加重,排除腰肌劳损、腰背肌筋膜炎、终板炎等其他可能导致腰痛的原因,腰椎 MRI 显示无明显椎间盘突出、神经根受压征象,腰椎 MRI T2 加权像上椎间盘信号强度降低,椎间盘后缘可见高信号区(high intensity zone, HIZ),椎间盘造影诱发疼痛试验阳性。其中椎间盘造影虽可作为目前诊断的“金标准”^[7],但由于其是有创性操作,可实施性仍存在较大争议,且本次研究对象均为单节段退变的椎间盘,故暂未将其纳入诊断标准,临床症状、影像学检查、鉴别诊断等均已完善,最大限度地确保诊断的准确性。纳入标准:(1)根据病史、影像学及体格检查诊断为 DLBP;(2)经完善腰椎 MRI 明确腰椎间盘退变改良 Pfirrmann 分级^[8]≤5 级;(3)经 3 个月以上的正规保守治疗效果不佳;(4)年龄≤60 岁。排除标准:(1)影像学证实有腰椎滑脱、椎间隙明显变窄、终板塌陷、脊柱侧弯等结构异常患者;(2)既往有

髓核摘除、融合等手术史造成椎间盘组织破坏患者;(3)合并精神疾病、心肝肾功能不全、血液病、肿瘤、严重呼吸系统疾病、严重脑血管疾病、自身免疫性疾病或极度衰弱者。本研究已获得本院伦理委员会批准(审批号:KY20230618-03),所有研究对象均签署知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 设备仪器及工作原理^[9]

上海联影医疗科技有限公司 80 排螺旋 CT 机;上海方润医疗科技股份有限公司射频消融刀头(FS D03)及主机;加拿大 FISO 公司生产的 FOP-MIV 医用压力传感器及信号调节器,以及装载测压软件 Evolution 的笔记本电脑。FOP-MIV 医用压力传感器的核心是 Fabry-Pérot 标准器,结构为:透明介质两侧是相平行的两块反射镜,反射镜间距已知等于 Fabry-Pérot 标准器传感腔的长度。Fabry-Pérot 标准器的反射光谱波长有明显峰值,作为物理上对应于 Fabry-Pérot 标准器传感腔的长度的函数。如图 1 所示,将可变形的柔性膜装在真空腔上,形成一个小的鼓形结构。鼓底部和柔性膜内表面构成传感腔。施加压力时,柔性膜向鼓底部凹陷,减少腔的长度(d)。对传感器进行校准后,腔的长度会对应一个压力值,其测量精度可达亚纳米级。

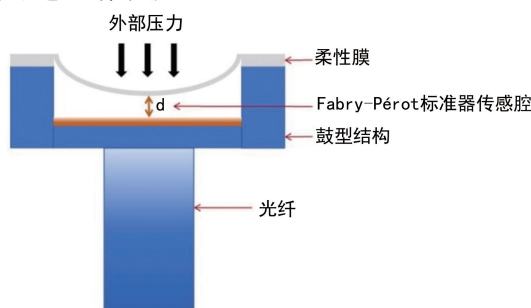


图 1 FOP-MIV 医用压力传感器工作原理

1.2.2 术前准备

所有患者入院后完善术前常规化验检查,做好术前各项评估及术前护理宣教,并告知手术方式和潜在风险,取得患者和家属的理解、配合,签署手术知情同意书。

1.2.3 PN 手术及测压方法

患者入 CT 室取俯卧位,嘱腰部肌肉放松,双上肢交叉环抱于枕上。CT 透视下定位穿刺点并设计穿刺路径。常规消毒铺巾、局部麻醉,穿刺针行靶点穿刺,再次行 CT 透视,确认穿刺针位于椎间盘中央。拔出针芯,将传感器连接测压监控系统,以大气压为基准校准后,经工作通道缓慢插入椎间盘中央,稳定后记

录读数。退出传感器并插入消融电极,在椎间盘内以适当频率往复旋转,根据手感及患者感受调节档位,对髓核组织依次进行分解气化、皱缩固化各约 20 s,观察穿刺针尾部有泡沫溢出或闻及焦糊味,或电极移动阻滞感降低后暂停手术,再次透视,观察髓核内出

现适量新发空腔,并与患者确认术前体征有一定好转,退出消融电极后同法再次测压。退出穿刺针,美敷覆盖创口,患者翻身取仰卧位返回病房,本组患者的手术均由临床经验丰富、实操技术娴熟的组长完成。相关患者资料见图 2。

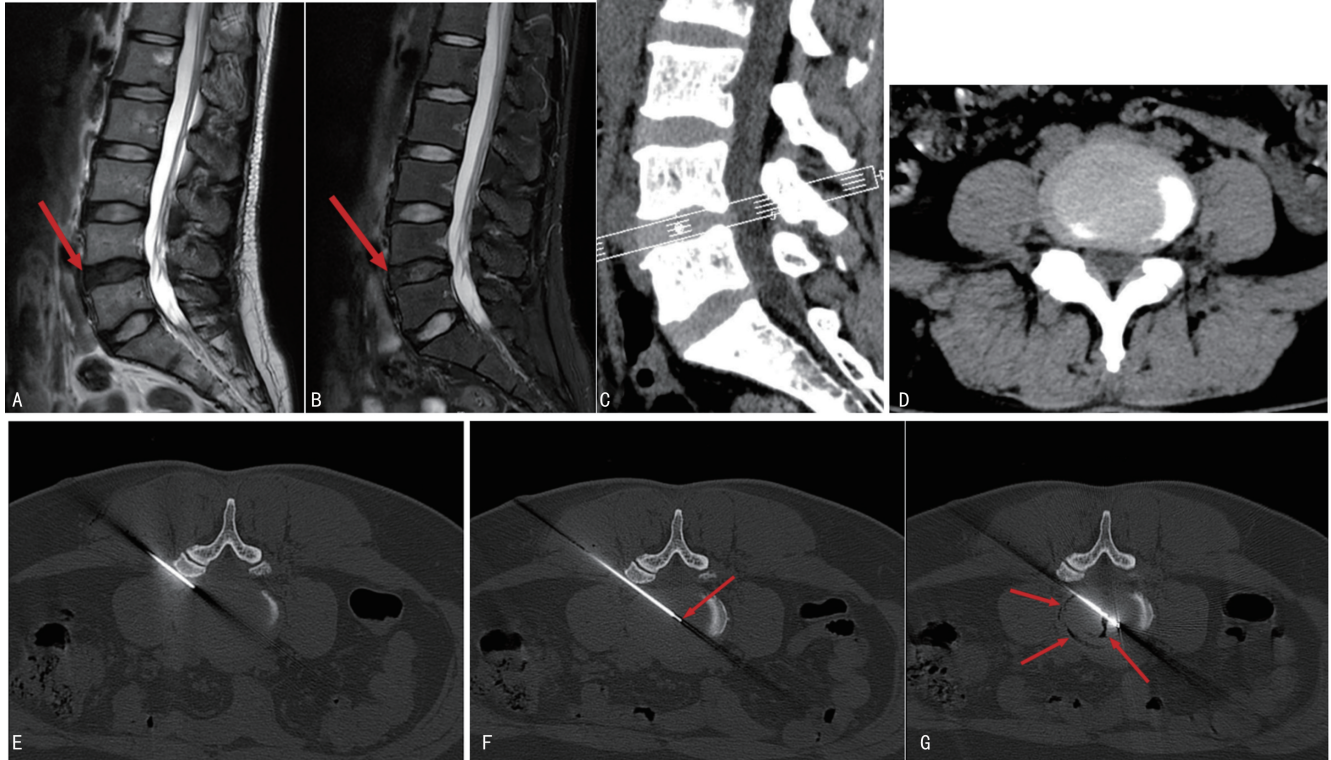


图 2 手术过程示意图

1.2.4 术后护理

术后行常规消肿、止痛、营养神经等对症治疗,2 h 可下床大小便,12 h 可佩戴腰围适当步行、活动,2~3 d 可出院。由骨科专科护士对患者进行健康宣教及护理,详细交代出院注意事项,主要包括:(1)一个月内以休息为主,继续口服消肿、营养神经药物,下床活动需佩戴腰围,避免久坐久站、弯腰负重、受凉、重盐饮食等;(2)一个月后停药,可卸下腰围活动,恢复日常生活、轻体力工作,并适当行腰背肌锻炼,但仍需避免久坐久站、弯腰负重、受凉、重盐饮食等不当事项;(3)尽量降低不当的生活及工作习惯对手术效果的影响。

1.3 观察指标

应用视觉模拟评分法(visual analogue scale, VAS)、日本骨科学会评分法(Japanese orthopaedic association scores, JOA)及 Oswestry 功能障碍指数(Oswestry disability index, ODI)评估患者的疼痛水平,评估时间节点分别为术前及术后 1 d、1 个月、3 个月。应用改良 MacNab 标准评估手术疗效,评估时间节点分别为术后 1 d、1 个月、3 个月,并将疗效优、良患者纳入“优良组”,疗效可、差患者纳入“可差组”。

于术前及术后即刻分别记录椎间盘内压力值并计算差值(术前椎间盘内压力值-术后椎间盘内压力值)及椎间盘内压力降低率,椎间盘内压力降低率=(术前椎间盘内压力-术后椎间盘内压力)/术前椎间盘内压力 $\times 100\%$ 。

1.4 统计学处理

采用 SPSS27.0 软件对数据进行统计分析。计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,比较采用配对 t 检验;对椎间盘内压力差值或椎间盘内压力降低率与疼痛评分差值间的关系采用线性相关分析;采用二分类 logistic 回归分析手术疗效的影响因素。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

所有患者均按照预定计划顺利完成手术及椎间盘内压力测量。术中及术后观察期间,未发现任何患者出现局部血肿,感染,血管、脊髓或神经损伤等并发症。所有患者出院后均按时完成随访,随访时间为 3 个月。术后即刻[(202.34 \pm 19.41)kPa]椎间盘内压力较术前[(247.52 \pm 22.04)kPa]明显降低,差异有统计学意义($P < 0.05$),椎间盘内压力降低率在 12.12%~34.93%。术后 1 d、1 个月、3 个月的 JOA

评分较术前明显上升, VAS 及 ODI 评分较术前明显下降, 差异有统计学意义 ($P < 0.05$), 见表 1。而术后各时间点间比较差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。选取术前与术后 1 d VAS、JOA 及 ODI 评分计算差值, 将三者分别与手术前、术后即刻椎间盘内压力差值及椎间盘内压力降低率进行线性相关分析, 结果均未发现明显相关性 ($P > 0.05$), 见表 2、3。依据改良 MacNab 标准对 30 例患者的手术疗效进行评估, 术后 1 d、1 个月、3 个月时的优良率分别为 66.7%、73.3% 和 63.3%, 各时间点的优良率比较差异无统计学意义 ($P > 0.05$), 见图 3。以术后 1 d 的疗效为因变量 (优良 = 0; 可差 = 1), 性别 (男 = 0; 女 = 1)、年龄、病程、BMI、椎间盘内压力差、椎间盘内压力降低率为自变量, 采用二分类 logistic 回归分析 PN 术后临床疗效的影响因素, 结果表明病程及椎间盘内压力降低率是临床疗效的影响因素, 见表 4。

表 1 手术前、后各时间点各疼痛评分比较 ($\bar{x} \pm s$, 分)

时间	VAS 评分	JOA 评分	ODI
术前	6.14 ± 1.21	12.06 ± 1.16	37.74 ± 5.75
术后 1 d	2.24 ± 0.73 ^a	19.97 ± 1.78 ^a	16.85 ± 3.49 ^a
术后 1 个月	2.17 ± 0.82 ^a	21.42 ± 1.52 ^a	16.12 ± 3.05 ^a
术后 3 个月	2.19 ± 0.69 ^a	20.01 ± 1.38 ^a	16.96 ± 3.27 ^a

^a: $P < 0.05$; 与术前比较。

表 2 手术前、后椎间盘内压力差值与各评分变化值间的相关分析 ($\bar{x} \pm s$)

项目	数值	线性相关分析	
		r	P
椎间盘内压力差值 ^a (kPa)	45.18 ± 18.27		
VAS 评分差值 ^a (分)	3.90 ± 0.96	0.285	0.086
JOA 评分差值 ^b (分)	7.91 ± 1.29	0.305	0.246
ODI 差值 ^a (分)	20.89 ± 3.74	0.308	0.188

^a: 术前 - 术后 1 d; ^b: 术后 1 d - 术前。

表 3 手术前、后椎间盘内压力降低率与各评分变化值间的相关分析 ($\bar{x} \pm s$)

项目	数值	线性相关分析	
		r	P
椎间盘内压力降低率 ^a (%)	17.05 ± 5.43		
VAS 评分差值 ^a (分)	3.90 ± 0.96	0.171	0.412
JOA 评分差值 ^b (分)	7.91 ± 1.29	0.262	0.362
ODI 差值 ^a (分)	20.89 ± 3.74	0.210	0.375

^a: 术前 - 术后 1 d; ^b: 术后 1 d - 术前。

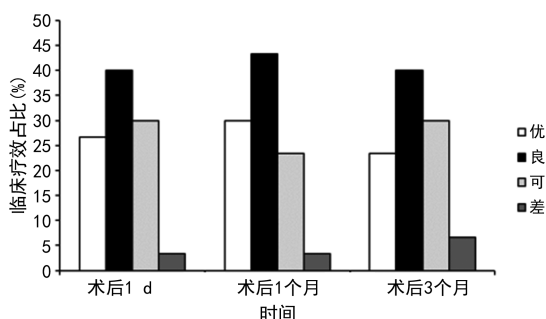


图 3 改良 MacNab 标准评估手术疗效

表 4 PN 术后疗效的二分类 logistic 回归分析

项目	OR (95% CI)	P
性别	2.275 (0.673 ~ 16.735)	0.324
年龄 (岁)	1.121 (0.782 ~ 1.209)	0.639
病程 (月)	1.064 (1.013 ~ 1.147)	0.036
BMI (kg/m ²)	0.894 (0.737 ~ 1.178)	0.864
椎间盘内压力差 (kPa)	1.492 (0.857 ~ 2.035)	0.271
椎间盘内压力降低率 (%)	1.258 (1.068 ~ 1.453)	0.033

3 讨 论

3.1 椎间盘结构及其压力产生机制

椎间盘主要由髓核、纤维环及软骨终板组成^[10]。髓核是一种类似胶体的结构, 主要由 II 型胶原蛋白等蛋白构成, 含有带负电荷的蛋白聚糖, 能够高效吸引细胞外的离子和水分, 因此, 髓核的水含量高达 80%, 呈黏性流体特性^[11]。纤维环构成椎间盘的最外层, 由多个同心圆形排列的胶原层组成, 每层都包含倾斜排列的 I 型胶原纤维束, 成纤维细胞群相对密集, 具备一定的弹性^[12]。软骨终板是厚度 < 1 mm 的水平透明软骨层, 位于椎间盘上下两端, 与椎体相连, 并与血管丰富的骨性终板松散结合, 充当物理和化学屏障, 作为过渡结构, 防止髓核与骨性终板直接接触进入椎体的海绵状组织内。它通过阻碍水和蛋白多糖从椎间盘排出到椎体中, 维持盘内压力, 并促进营养物质扩散进入椎间盘^[13]。综上所述, 髓核实际上被包裹在由纤维环和软骨终板构成的封闭系统中, 这一结构对于维持椎间盘的正常功能至关重要。

由于髓核的涵水能力, 椎间盘在未承受外部负荷时会保持一定的盘内压力, 称为预负荷状态。此外, 椎间盘周围肌肉与韧带的张力亦对椎间盘产生内部负荷, 共同形成了椎间盘内压力环境^[14]。在尸体椎间盘的研究中发现, 髓核能够产生约 0.05 MPa 的静水压力来抵抗压缩力^[15]。当受到较高压力时, 髓核内的物质可侵入纤维环的胶原纤维层, 导致邻近板层的损伤。在 DLBP 的患者中, 由于多种损伤因素的影响, 椎间盘内压力升高, 导致细胞和基质的营养供应减少, 引发髓核组织的脱水与碎裂。此外, 髓核组织对纤维环薄弱部位施加的压力可能导致纤维环破裂, 刺激和压迫神经组织, 引起腰痛等症状。综上所述, DLBP 的发病机制涉及髓核退变、内部压力增加、纤维环破裂、神经组织的刺激和压迫等。

3.2 PN 的优势及减压原理

PN 是在 40 ~ 70 °C 的环境中通过使用特定的射频电能激发刀头周围的介质 (NaCl), 形成高度电离的 Na⁺ 薄层, 从而打破髓核组织的分子键, 将其裂解为元素分子和低分子气体 (如 O₂、H₂、CO₂ 等)。电极的消融模式在 40 °C 下切割、分解和气化组织, 形成空隙。接着利用热凝模式, 将温度提高至 70 °C, 使胶原纤维收缩固化。这种消融和热凝结合的方式可以使

腰椎间盘突出在纤维环的张力和周围韧带的压迫下回缩,减轻对硬膜囊、神经末梢和周围疼痛感受器的压迫和刺激,达到治疗目的^[16]。由于其工作温度较低,对纤维环、软骨终板及椎间盘周围组织的影响较小,从而保证了其安全性^[17-18],也保证了通过测量盘内压力来评估手术效果的可行性和可信度。

此前,针对盘源性疾病的化学核溶解、经皮髓核切开术、经皮椎间盘切除术和激光治疗等已被证明可以降低椎间盘内压力。然而,由于这些技术存在局限性、并发症较多和创伤较大等缺点,目前已逐渐被 PN 取代。吴利洲等^[19]通过有限元模型成功证实 PN 能降低椎间盘内压力,但有限元模型并不适用于所有情况,体内直接测量才能提供更准确的数据^[20]。CHEN 等^[21]通过实验证实,PN 可以降低非严重退变的椎间盘内压力,但该研究是在人类尸体上进行的,目前仍缺乏人类活体状态下 PN 对椎间盘内压力影响的研究,本次实验填补了上述空缺,结果显示,PN 术后椎间盘内压力及各项评分与术前比较差异均有统计学意义($P < 0.05$),充分证实了 PN 通过降低 DLBP 患者椎间盘内压力,达到了缓解临床症状的效果。

3.3 本次研究的意义与不足

本研究在评分变化与椎间盘内压力差值和椎间盘内压力降低率间均未发现明显相关性($P > 0.05$),而 logistic 回归分析表明病程及椎间盘内压力降低率为临床疗效的影响因素($P < 0.05$)。病程长短在患者就诊时已确定,而压力的降低程度是可以人为干预的。以往术者主要把术中患者疼痛的改善和 CT 透视观察到盘内新发的“空腔”作为手术满意的标志,二者均相对主观,而通过传感器测压可以直观地了解椎间盘内压力的变化,为术者寻找最合适的时机和减压值来结束手术提供依据,避免不充分或者不必要的操作,以达到“适度且到位”的最佳疗效;本次研究大部分患者椎间盘内压力的降低率在 15%~20%,且症状均有明显改善,可见术中并不能盲目追求过高的压力差值,而应根据基础压力的高低估算出合适的减压范围,具有一定的参考价值。当然,由于样本量的限制,本研究所得的减压率可能并不适用于所有患者。

此外,本研究在术中随机抽取了部分患者,并在进行 1、2、3 档消融后分别进行了压力测量。结果发现,部分患者在接受 1 档或 2 档消融后,椎间盘内压力变化值已经达到了最终变化值的 90% 以上。即随着消融的进行,椎间盘内压力不再明显降低,但症状仍呈明显的改善趋势。猜测原因可能是:(1)椎间盘周围的疼痛感受器对于盘内压力的下降可能存在一定的反应延迟,即便压力趋于稳定,感受器仍在持续地反馈疼痛信号;(2)除升高的椎间盘内压力,髓核和纤维环中大量巨噬细胞聚集引发的炎症反应亦主导着椎间盘的退变^[22],其中主要包括白细胞介素-1 α / β (interleukin-1 α / β , IL-1 α / β)、IL-6、IL-8 及肿瘤坏死因

子- α 等炎症因子^[23];随着消融档位和功率的提升,椎间盘内的炎症介质水平逐渐降低,减少了对神经根和周围神经组织的刺激,导致患者疼痛缓解。而部分椎间盘内压力差值及椎间盘内压力降低率尚可的患者疗效不尽相同,考虑较长的病程及初始较高水平的炎症因子未得到有效释放是主要因素。

当然,本研究还存在一些限制。传感器尺寸可能会导致压力测量误差。ELLIOTT 等^[24]的研究亦证明,穿刺针进入椎间盘形成通道后会对其机械效应(如轴向刚度、弯曲刚度或椎间盘内压力)造成改变。当针直径与椎间盘高度之比 $< 25\%$ 时对椎间盘内压力无影响;在 25%~40%时对椎间盘内压力可能产生轻微影响; $> 40\%$ 时椎间盘内压力则变化明显。解剖学研究表明,成年人下腰部椎间盘中央高度一般 > 15 mm^[25]。本研究使用的穿刺针直径为 1.52 mm,针直径与椎间盘高度之比约为 10%,理论上虽可排除影响,但由于个体体型差异及退变程度均会影响椎间盘实际高度,且不同传感器的测压原理和材质各不相同,仍然缺乏充分的依据来排除传感器造成的误差。

另外,CHEN 等^[21]的研究显示 PN 在椎间盘减压方面依赖于脊柱退变的程度,对严重退变的椎间盘效果可能不佳。这可能是由于椎间盘退变的加剧及年龄的增长导致盘内基础压力大幅降低^[26]。因此,本研究选择的样本均为椎间盘退变程度相对较轻(改良 Pfirrmann 分级 ≤ 5 级)的患者。关于 PN 在人类活体重度椎间盘退变中的减压效果如何,重度退变的椎间盘压力相对较低但患者疼痛程度反而更重的原因,以及椎间盘周围和中央压力是否存在统计学差异,这些问题在本次研究中均未作深入探讨,需要不断完善对影响因素的控制,扩大样本数量和种类,进行多元化分析,以期 PN 在椎间盘退行性疾病治疗方面提供理论指导。

参考文献

- [1] 沈锋,刘观焱.椎间盘源性腰痛的研究进展[J].中国骨与关节损伤杂志,2021,36(9):1002-1004.
- [2] FUKUI D,KAWAKAMI M,MATSUMOTO T,et al. Stress enhances gait disturbance induced by lumbar disc degeneration in rat[J]. Eur Spine J,2018,27(1):205-213.
- [3] 王沛,董强,雪原.腰椎间盘突出病变部的压力测定及其病理学意义[J].中华骨科杂志,2002,22(3):4-8.
- [4] 轩安武,朱振标,徐成,等.椎间盘源性腰痛的诊断及治疗进展[J].局解手术学杂志,2022,31(1):81-86.
- [5] 张建波,陈金生,宫庆娟,等.椎间盘内注射富血

- 小板血浆与射频热凝治疗盘源性腰痛的疗效比较[J]. 中国疼痛医学杂志, 2022, 28(7): 515-521.
- [6] PECK J, URITS I, PEOPLES S, et al. A comprehensive review of over the counter treatment for chronic low back pain[J]. *Pain Ther*, 2021, 10(1): 69-80.
- [7] 周杨, 葛韧, 张远, 等. 椎间盘造影在诊断椎间盘源性腰痛中的应用[J]. *临床骨科杂志*, 2024, 27(1): 16-19.
- [8] GRIFFITH J F, WANG Y X, ANTONIO G E, et al. Modified Pfirrmann grading system for lumbar intervertebral disc degeneration [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2007, 32(24): E708-712.
- [9] 孙强, 吴志浩, 王力娟, 等. 一种基于髓核消融测压应用的消融方法: CN113229925A[P]. 2021-08-10.
- [10] FRANCISCO V, PINO J, GONZÁLEZ-GAY M Á, et al. A new immunometabolic perspective of intervertebral disc degeneration[J]. *Nat Rev Rheumatol*, 2022, 18(1): 47-60.
- [11] LAMA P, TEWARI J, ADAMS M A, et al. Degenerative physiochemical events in the pathological intervertebral disc [J]. *Histol Histopathol*, 2022, 37(1): 11-20.
- [12] GHEZELBASH F, SHIRAZI-ADL A, BAGHANI M, et al. On the modeling of human intervertebral disc annulus fibrosus: elastic, permanent deformation and failure responses [J]. *J Biomech*, 2020, 102: 109463.
- [13] FUJIWARA T, AKEDA K, YAMADA J, et al. Endplate and intervertebral disc injuries in acute and single level osteoporotic vertebral fractures: is there any association with the process of bone healing? [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2019, 20(1): 336.
- [14] 叶晓健, 李家顺, 胡玉华, 等. 颈椎间盘压力的测定及其临床意义[J]. *第二军医大学学报*, 1997, 18(6): 88-90.
- [15] MELROSE J, ROBERTS S, SMITH S, et al. Increased nerve and blood vessel ingrowth associated with proteoglycan depletion in an ovine annular lesion model of experimental disc degeneration[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2002, 27(12): 1278-1285.
- [16] WU S, LI X, LIN C, et al. CT-guided nucleoplasty with radiofrequency energy for the treatment of lumbar disk herniation [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2015, 28(1): E9-16.
- [17] CHOI Y C, SEO J H, Kim P. Clinical efficacy of nucleoplasty for uncontained lumbar disc herniation: a retrospective study [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2024, 25(1): 12.
- [18] 张忠, 黄春苹, 黄美娜, 等. 椎间盘源性腰痛的微创介入治疗研究进展 [J]. *外科研究与新技术*, 2022, 11(3): 191-192, 206.
- [19] 吴利洲, 谢文伟, 李再学. 射频消融成形术后椎间盘内压力变化的有限元分析 [J]. *中国实用医药*, 2020, 15(6): 77-79.
- [20] VICECONTI M, PAPPALARDO F, RODRIGUEZ B, et al. In silico trials: verification, validation and uncertainty quantification of predictive models used in the regulatory evaluation of biomedical products [J]. *Methods*, 2021, 185: 120-127.
- [21] CHEN Y C, LEE S H, CHEN D. Intradiscal pressure study of percutaneous disc decompression with nucleoplasty in human cadavers [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2003, 28(7): 661-665.
- [22] LYU F J, CUI H, PAN H, et al. Painful intervertebral disc degeneration and inflammation: from laboratory evidence to clinical interventions [J]. *Bone Res*, 2021, 9(1): 7.
- [23] WANG L, HE T, LIU J, et al. Revealing the immune infiltration landscape and identifying diagnostic biomarkers for lumbar disc herniation [J]. *Front Immunol*, 2021, 12: 666355.
- [24] ELLIOTT D M, YERRAMALLI C S, BECKSTEIN J C, et al. The effect of relative needle diameter in puncture and sham injection animal models of degeneration [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2008, 33(6): 588-596.
- [25] GRUNHAGEN T, SHIRAZI-ADL A, FAIRBANK J C, et al. Intervertebral disk nutrition: a review of factors influencing concentrations of nutrients and metabolites [J]. *Orthop Clin North Am*, 2011, 42(4): 465-477.
- [26] LIEBSCH C, WILKE H J. How do disc degeneration, age, sex, and level affect the intradiscal pressure of the lumbar spine? An in vitro database evaluation of 107 human specimens [J]. *Brain Spine*, 2023, 3(Suppl. 2): 123-124.