

经皮球囊压迫术中初压维持策略对术后疗效及复发的影响

董浩宇, 宁显宾*, 孙乐飞, 徐东梅

北华大学附属医院神经外科, 吉林 吉林

收稿日期: 2026年2月16日; 录用日期: 2026年3月9日; 发布日期: 2026年3月18日

摘要

背景: 三叉神经痛(TN)因剧烈疼痛而严重危害患者健康。经皮穿刺三叉神经球囊压迫术(PBC)作为一种重要微创治疗手段, 通过充盈球囊选择性损伤半月节内有髓纤维, 阻断疼痛传导。与传统术式相比, 其具有创伤小、恢复快等优点, 且可通过调节球囊充盈参数控制疗效。然而, 术中是否应主动维持囊内压力恒定及其对患者远期预后的影响, 目前尚无定论。本研究旨在固定压迫时间的前提下, 探讨术中维持球囊初始压力对PBC术后疗效及复发的影响, 以期优化手术操作、提高长期缓解率提供客观依据。**方法:** 回顾性纳入2021年1月至2023年12月于我院接受PBC治疗且符合标准的106例TN患者。根据术中压力管理方式分为两组: 维持初压组($n = 49$), 使用连续测压计动态调控, 使球囊在形成理想梨形后维持其初始压力(波动范围 $\pm 5\%$)持续压迫120 s; 非维持组($n = 57$), 球囊充盈至梨形后停止调控, 囊内压自然衰减, 同样压迫120 s。术后随访至少24个月, 评估并比较两组患者的疼痛缓解程度、复发率及相关并发症。**结果:** 两组患者在年龄、性别、病程、疼痛侧别及受累分支等基线资料上均衡可比($P > 0.05$)。术中压力监测显示, 两组初始充盈压力无统计学差异($P = 0.791$); 但维持初压组的平均压力及压迫末期的压力均显著高于非维持组, 且压力下降百分比显著更低($P < 0.001$), 效应量大($r = 0.86$)。术后早期(24小时、3个月)疼痛缓解率组间无显著差异($P > 0.05$)。术后1年, 维持初压组的疼痛缓解率(95.90%)显著高于非维持组(84.20%, $P = 0.049$)。术后24个月, 维持初压组的复发率(8.20%)显著低于非维持组(22.80%, $P = 0.041$), Kaplan-Meier生存分析显示其累积无痛生存率更优($P = 0.039$)。并发症方面, 术后3个月维持初压组面部麻木发生率较高(63.30% vs. 36.80%, $P = 0.007$), 但两组在咀嚼肌无力、口周疱疹等其他并发症发生率上无显著差异($P > 0.05$), 均无严重并发症发生。**结论:** 术中球囊内初压力维持策略($\pm 5\%$)可在不增加术后并发症发生率的情况下增强镇痛效果的持久性, 是一种有效、安全的新方法。

关键词

三叉神经痛, 球囊压迫术, 囊内压, 压力维持

*通讯作者。

Effect of Initial Pressure Maintenance Strategy in Percutaneous Balloon Compression on Postoperative Efficacy and Recurrence

Haoyu Dong, Xianbin Ning*, Lefei Sun, Dongmei Xu

Department of Neurosurgery, Affiliated Hospital of Beihua University, Jilin Jilin

Received: February 16, 2026; accepted: March 9, 2026; published: March 18, 2026

Abstract

Background: Trigeminal neuralgia (TN) severely compromises patient health due to its excruciating pain. Percutaneous balloon compression (PBC), as a key minimally invasive treatment, selectively damages myelinated fibers within the ganglion by inflating a balloon to block pain transmission. Compared to traditional procedures, it offers advantages such as reduced trauma and faster recovery, while therapeutic efficacy can be controlled by adjusting balloon inflation parameters. However, whether to actively maintain constant intraballoon pressure during the procedure and its impact on long-term patient outcomes remain inconclusive. This study aims to investigate the effects of maintaining initial balloon pressure during PBC on postoperative efficacy and recurrence rates, while keeping the compression duration constant, to provide objective evidence for optimizing surgical techniques and improving long-term relief rates. **Methods:** A retrospective cohort study included 106 TN patients who underwent PBC at our hospital between January 2021 and December 2023 and met the inclusion criteria. Patients were divided into two groups based on intraoperative pressure management: Initial Pressure Maintenance Group (n = 49): Continuous pressure monitoring dynamically adjusted balloon pressure to maintain the initial pressure ($\pm 5\%$ fluctuation range) after achieving an ideal pear-shaped contour, with sustained compression for 120 seconds. Non-Maintenance Group (n = 57): Balloon pressure was adjusted only until achieving a pear-shaped contour, after which pressure was allowed to decay naturally, with compression maintained for 120 seconds. Patients underwent at least 24 months of postoperative follow-up to evaluate and compare pain relief, recurrence rates, and related complications between groups. **Results:** Baseline characteristics including age, gender, disease duration, pain side, and affected branches were comparable between groups ($P > 0.05$). Intraoperative pressure monitoring revealed no statistically significant difference in initial filling pressure between groups ($P = 0.791$). However, the mean pressure and end-compression pressure were significantly higher in the initial pressure maintenance group compared to the non-maintenance group, with a significantly lower percentage of pressure decline ($P < 0.001$) and a large effect size ($r = 0.86$). Early postoperative pain relief rates (at 24 hours and 3 months) showed no significant intergroup differences ($P > 0.05$). At 1 year postoperatively, the pain relief rate in the initial pressure maintenance group (95.90%) was significantly higher than that in the non-maintenance group (84.20%, $P = 0.049$). At 24 months postoperatively, the recurrence rate in the initial pressure maintenance group (8.20%) was significantly lower than that in the non-maintenance group (22.80%, $P = 0.041$). Kaplan-Meier survival analysis demonstrated superior cumulative pain-free survival in the initial pressure maintenance group ($P = 0.039$). Regarding complications, the initial pressure maintenance group exhibited a higher incidence of facial numbness at 3 months postoperatively (63.30% vs. 36.80%, $P = 0.007$). However, no significant differences were observed between groups for other complications such as masticatory muscle weakness or

perioral herpes ($P > 0.05$), and no severe complications occurred in either group. Conclusion: The intraoperative balloon pressure maintenance strategy ($\pm 5\%$) enhances the durability of analgesia without increasing postoperative complication rates, representing an effective and safe novel approach.

Keywords

Trigeminal Neuralgia, Balloon Compression, Intrabulbar Pressure, Pressure Maintenance

Copyright © 2026 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

三叉神经痛(Trigeminal Neuralgia, TN)是一种表现为三叉神经分布区域内反复发作的剧烈疼痛的神经系统疾病,该疾病不仅严重影响患者的生活质量,还常导致焦虑、抑郁和睡眠障碍等一系列心理问题[1][2]。药物治疗为三叉神经痛(TN)的一线管理策略[3]。然而,针对药物治疗无效或难以耐受其不良反应的难治性病例,手术治疗成为重要的替代方案[4][5]。当影像学检查明确提示三叉神经根受到血管压迫时,微血管减压术(Microvascular Decompression, MVD)通常被认为是可能带来长期缓解的首选外科干预方式[6][7]。但文献报道显示[8]-[10],3%~17%以上的MVD术中未能发现明确的责任血管,对于此类患者以及特发性三叉神经痛患者,MVD的术后缓解率似乎较低,且复发风险较高。经皮穿刺三叉神经球囊压迫术(Percutaneous Balloon Compression, PBC)自1983年由Mullan和Lichter首次报道以来,已成为治疗TN的重要微创手段之一,尤其适用于老年患者、无法耐受开颅手术或MVD术后复发的病例,在临床中作为有效的补充疗法广泛应用[11][12]。

PBC的疗效取决于球囊对三叉神经节(Gasserian神经节)的压迫效果,目前PBC术中压力管理尚未形成统一标准。当前共识认为“梨形”形态是手术成功的标志[13];术中球囊压力调控、Meckel囊形态等是影响压迫效果及长期复发风险的关键因素[14]-[16];术后面部麻木可作为早期和长期预后的重要指标,提示球囊对神经节的压迫充分程度,压迫越充分,疼痛复发的可能性越低[17][18]。但近期研究表明,即使达到“梨形”,不同患者间的实际囊内压力也存在很大差异,且压力在维持期内会随时间显著衰减[19]。这表明,单纯关注初始充盈压力和静态形态可能忽略了术中动态力学环境变化对预后的影响。基于此,本研究拟在固定压迫时长的基础上,引入便携式连续测压装置,记录球囊达到理想形态时的初始压力,并通过术中实时调控,比较主动维持初始压力与压力自然衰减两种模式对三叉神经痛患者术后疼痛缓解率、复发率及并发症的影响,旨在为PBC手术探索一种更为客观、量化的压力管理方案,以优化手术技术,最终提升患者的长期临床获益。

2. 研究对象及方法

2.1. 患者

2021年1月至2023年12月期间在本单位接受PBC治疗且符合纳入标准的106名患者。所有患者或其家属均提供了书面知情同意书。所有患者术前均行MRI检查排除继发性三叉神经痛,并行颅底CT三维重建观察卵圆孔的形态与位置。本研究通过了当地伦理委员会的审查和批准。纳入PBC手术患者符合以下标准:(1)均符合临床原发性三叉神经痛的诊断标准并确诊;(2)对药物治疗无效或出现严重不良

反应的原发性(特发性和典型性)三叉神经痛；(3) 均为首次接受手术治疗。

2.2. 手术方法

术前常规注射阿托品 0.5 mg 预防三叉神经心脏反射，全身麻醉(以下简称全麻)插管后取仰卧体位(条件允许予以喉罩减轻术后不适)，头部放自然正中位，C 臂 X 线机或血管造影机正侧位影像结果提示双侧骨性外耳道完全重叠，采用 Hartel 前入路法，患侧口角外 2~3 cm 处进针，在正侧位监视引导下，采用 14 号穿刺针穿刺卵圆孔，当针尖抵达卵圆孔时即撤出针芯，通过穿刺针将带导丝 4 号 Fogarty 球囊经卵圆孔导入 Meckel 氏腔，撤出球囊导丝，缓慢向球囊内注射非离子造影剂碘帕醇充盈球囊，一般充盈量为 0.3~0.8 ml(平均 0.5 ml)，边注射对比剂边检查球囊的形状及位置，根据显影情况及时排空球囊并调整导管位置，直至理想的“梨形”出现。维持初压组：术中采用连续测压计实时调控，以连续测压计的数据为指引，通过手动操作带精密刻度的 1 毫升注射器，进行多次、极微量的造影剂推注，维持梨形球囊初压($\pm 5\%$) 120 s；非维持组：充盈至梨形后停止调控，囊内压自然衰减，压迫 120 s。120 s 后排空球囊，并与穿刺针同时撤出，压迫穿刺点止血约 5~10 min 后予无菌敷贴覆盖穿刺点，循序苏醒患者，治疗完毕。所有手术均由一位主刀医生完成。

2.3. 成果评估

2.3.1. 评估标准

术后采用采用巴罗神经病学研究所(BNI)疼痛强度分级对患者的疼痛缓解效果进行评估，具体标准为：(1) I 级：无疼痛；(2) II 级：偶有疼痛，无需药物治疗；(3) III 级：疼痛，应用药物可达到有效控制；(4) IV 级：疼痛，应用药物无法完全控制；(5) V 级：剧烈疼痛/疼痛无法缓解。其中 I~II 级定义为有效治疗；随访过程中疼痛级别由 I、II 级上升至 III、IV、V 级定义为复发。

2.3.2. 评估内容

术后随访评估：观察术后第 1 天疼痛缓解或并发症出现情况；术后 1 周、1 个月、3 个月、6 个月、12 个月、18 个月、24 个月通过电话或门诊对患者进行随访，记录各组疼痛缓解情况及术中和术后并发症(三叉神经抑制反应、面部麻木、面部感觉减退、咀嚼肌无力、耳鸣、复视、角膜炎、唇疱疹、头痛、脑出血、失明)的病例数和恢复时间，直至疼痛症状复发或消失，死亡或失访例数予以剔除，随访截止时间：2025 年 12 月。以上项目评估均由患者主刀医生及第一助手同时进行，术后随访通过门诊或电话方式进行。

3. 统计学方法

统计分析采用 IBM SPSS Statistics 25.0 版(IBM 公司)。以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。计量资料：符合正态分布的计量资料(年龄、病程、球囊初压、末压、平均压力等)以均值 \pm 标准差表示，组间比较采用独立样本 t 检验；非正态分布的计量资料(压力下降百分比)以中位数(四分位数间距) [M(IQR)] 表示，组间比较采用 Mann-Whitney U 检验。计数资料：以例数(百分比) [n (%)] 表示，组间比较采用卡方(χ^2) 检验；当理论频数 < 5 时，采用 Fisher 精确检验。生存分析：采用 Kaplan-Meier 法绘制患者术后无痛生存曲线，组间生存曲线及累积无痛生存率的比较采用 Log-rank 检验。效应量分析：采用 r 值评估组间差异的效应量，其中 $r \geq 0.8$ 提示效应量极强，用于进一步判定统计结果的临床意义。

4. 成果

4.1. 患者人口学及临床特征

排除失去随访患者后，本研究共纳入 106 例接受经皮三叉神经球囊压迫术(PBC)治疗患者，其中维持

初压组 49 人、非维持初压组 57 人，所有患者均接受了至少 24 个月的随访。两组患者在年龄、性别、病程等基线特征上均无显著差异($P > 0.05$)，具有可比性(表 1)，两组患者疼痛侧别及分支如表 2 所示。

Table 1. Population baseline comparison

表 1. 人口基线对比

变量	维持初压组(n = 49)	非维持初压组(n = 57)	效应量(P 值)
年龄	68.38 ± 9.38	65.87 ± 10.51	0.201
病程	5.32 ± 5.18	5.15 ± 5.09	0.865
性别(女/男)	29/20	37/20	0.544

Table 2. Site of lesion

表 2. 病变部位

病变束支		V1	V2	V3	V1 + V2	V1 + V3	V2 + V3	V1 + V2 + V3	总计
维持初压组	左侧	0	7	4	1	0	6	1	19
	右侧	1	17	4	2	0	5	1	30
非维持初压组	左侧	1	9	0	3	0	4	0	17
	右侧	2	12	7	4	1	12	2	40

4.2. 术中压力参数

如预期，两组患者的球囊初始充盈压力无统计学差异($P = 0.791$)，而维持初压组的末压力(139.97 ± 12.75 KPa)显著高于非维持初压组(117.22 ± 14.09 KPa)，且差异具有统计学意义($P < 0.001$)；维持初压组的压力下降百分比中位数(2.60%，IQR: 0.95%，3.85%)，显著低于非维持初压(18.40%，IQR: 13.25%，23.85%)，差异具有高度的统计学意义($U = 0.000$, $Z = -8.850$, $P < 0.001$)，效应量分析($r = 0.86$)表明维持策略能有效减少手术操作过程中压力的自然流失或人为释放，使球囊在压迫结束时仍能保持接近初始水平的压力。同时我们也观察到，维持初压组的整个压迫过程中的平均压力(141.74 ± 13.05 KPa)也显著高于非维持初压组(130.76 ± 14.30 KPa, $P < 0.001$)。这从整体上证实了维持策略能为三叉神经节提供更持续、更稳定的压迫力。详细压力参数对比见表 3。

Table 3. Intraoperative pressure parameters

表 3. 术中压力参数

	维持初压组	非维持初压组	效应量
球囊内初压力(KPa)	143.5 ± 13.42	144.28 ± 15.93	$P = 0.791$
球囊内末压力(KPa)	139.97 ± 12.75	117.22 ± 14.09	$P = 0.000$
球囊平均压力	141.74 ± 13.05	130.76 ± 14.30	$P = 0.000$
压力下降百分比	2.60% (IQR: 0.95%, 3.85%)	18.40% (IQR: 13.25, 23.85)	$R = 0.860$

4.3. 术后疗效

术后不同时间点，两组疼痛缓解率如表 4 所示。术后 24 小时内，维持初压组的 49 例(缓解率: 100.00%)患者均获得疼痛缓解，其中，47 人(95.90%)达到完全无痛(BNI: I 级)，仅 2 人疼痛症状未完全缓解(BNI: II 级)，但不需用药；非维持初压组的 57 例患者中，55 例(缓解率 96.50%)获得疼痛缓解，其中 50 人(87.72%)达到疼痛完全缓解(BNI: I 级)，5 人(8.77%)症状未完全缓解(BNI: II 级)但无需用药，仅 2 例(3.50%)患者

仍存在疼痛症状(未缓解率 3.50%),用药物可达到有效控制。经 Fisher 精确检验分析,尽管维持初压组的缓解率略高于非维持初压组,但两组间的差异未达到统计学显著性(Fisher 检验, $P=0.498$)。在远期疗效方面,术后 1 年随访时,维持初压组的疼痛缓解率为 95.90%,显著高于非维持初压组的 84.20%,差异具有统计学意义($P=0.049$)。这一结果提示,在术后早期阶段,两种压力管理策略均可快速有效阻断痛觉传导,获得相似的即时镇痛效果,但术中维持初压的策略可显著降低患者术后 1 年的疼痛复发风险,体现出更优的长期疗效稳定性。

Table 4. Comparison of pain relief
表 4. 疼痛缓解情况对比

组别	术后 24 小时疼痛缓解		术后 3 个月疼痛缓解		术后 1 年疼痛缓解	
	+	-	+	-	+	-
维持初压组	49 (100.00%)	0 (0.00%)	49 (100.00%)	0 (0.00%)	47 (95.90%)	2 (4.10%)
非维持初压组	55 (96.50%)	2 (3.50%)	54 (94.70%)	3 (5.30%)	48 (84.20%)	9 (15.80)
χ^2			1.085		3.883	
P	0.498 (Fisher 检验)		0.298		0.049	

4.4. 术后并发症

两组患者术后并发症情况如表 5 所示,维持初压组和非维持初压组在术后立即出现面部麻木的患者比例均较高(95.90% vs. 91.20%),这可能与术后疼痛立即缓解相关,但两组在统计学上无显著差异($\chi^2 = 0.333$, $P = 0.564$)。随访至术后 3 个月时,两组患者的面部麻木发生率出现显著分化,维持初压组仍有 63.30%的患者存在面部麻木,这一比例显著高于非维持初压组的 36.80% ($\chi^2 = 7.361$, $P = 0.007$)。在其它并发症方面,两组患者术后咀嚼肌无力(2.00% vs. 3.50%, $P = 1.000$)与口周疱疹(8.20% vs. 10.50%, $P = 0.935$)的发生率均较低,且无显著差异。本次调查中,所有术后患者均未记录到包括脑脊液漏、脑膜炎或死亡在内的严重术后并发症。

Table 5. Postoperative complications
表 5. 术后并发症情况

组别	术后立即面部麻木		术后 3 个月面部麻木		咀嚼肌无力		口周疱疹	
	+	-	+	-	+	-	+	-
维持初压组	47 (95.90%)	2 (4.10%)	31 (63.30%)	18 (36.70%)	1 (2.00%)	48 (98.00%)	4 (8.20%)	45 (91.80%)
非维持初压组	52 (91.20%)	5 (8.80%)	21 (36.80)	36 (63.20%)	2 (3.50%)	55 (96.50%)	6 (10.50%)	51 (89.50%)
χ^2	0.333		7.361		0.000		0.007	
P	0.564		0.007		1.000		0.935	

4.5. 术后复发与 Kaplan-Meier 生存分析

术后 3 个月随访时,维持初压组未记录到疼痛复发患者,非维持初压组记录到 1 例患者出现复发,但应用药物缓解良好;术后 12 个月随访时,维持初压组 2 例患者和非维持初压组 9 例患者出现复发;术后 24 个月随访时,维持初压组 4 例患者和非维持初压组 13 例患者出现复发。总体 2 年复发率具有显著差异(8.20% vs. 22.80%, $\chi^2 = 4.196$, $P = 0.041$),如表 6 所示。

为动态评估两组患者术后无痛生存时间，本实验绘制了 Kaplan-Meier 生存曲线，见图 1。结果显示，维持初压组的累积无痛生存率曲线显著高于非维持初压组，疼痛复发时间更晚、累积无痛生存率更高 (Log-rank $\chi^2 = 4.281, P = 0.039$)。术后 12 个月时，维持初压组的累积无痛生存率为 95.9%，非维持初压组为 84.2%；随着随访时间延长至 24 个月，两组累积无痛生存率分别为 91.8%和 77.2%，组间差异随时间推移呈逐渐扩大趋势。

Table 6. Overall recurrence rate
表 6. 总体复发情况

组别	术后 24 个月复发	
	+	-
维持初压组	4 (8.20%)	45 (91.80)
非维持初压组	13 (22.80%)	44 (77.20%)
χ^2	4.196	
P	0.041	

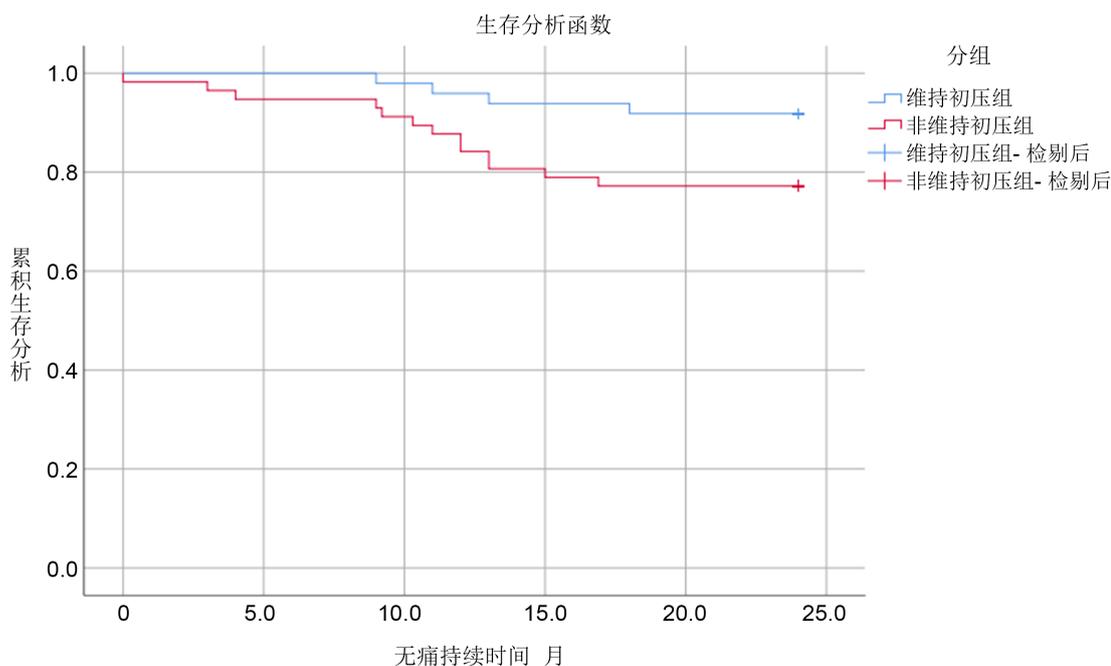


Figure 1. Kaplan-Meier survival analysis

图 1. Kaplan-Meier 生存分析

5. 讨论

5.1. 两组基线特征可比性分析

本研究严格遵循对照原则，两组患者在人口学特征、疼痛侧别及病变分支分布上均无显著差异 (P 均 > 0.05)，有效排除基线混杂因素，确保了研究结果的可靠性与可比性，为后续疗效及并发症分析奠定基础。

5.2. 术中压力参数差异及临床意义

两组球囊初始充盈压力无显著差异，其原因可能在于本研究术中均以球囊首次形成标准梨形形态时

的压力作为初始充盈压力。目前国内外研究普遍认为，球囊“梨形”形态是判断压迫靶点精准、初始压迫强度适宜的核心直观指标[20][21]，本研究严格遵循该共识设定初始压力，确保了两组患者初始压迫强度的一致性与可比性。

而维持初压组的末压力、平均压力显著高于非维持初压组，压力下降百分比显著低于非维持初压组($P < 0.001$)，表明在无人干预情况下，球囊在成标准“梨形”后，囊内压力会逐渐衰减，与 Shi 等[19]的观测结果一致。这可能与 Meckel 囊的解剖相关，随着压迫时间增加，球囊会向周围海绵窦、小脑幕等软性结构扩张，导致囊内压下降[22]。初压维持策略可有效减少压力流失，为三叉神经节提供持续稳定的机械压迫。

5.3. 术后疗效及无痛生存情况对比

两组术后早期疼痛缓解率无显著差异，提示两种压力管理策略均能实现良好的即时镇痛效果。但随访时间延长，差异逐渐显现，维持初压组术后 1 年疼痛缓解率更高、24 个月复发率更低(P 均 <0.05)。Kaplan-Meier 生存分析进一步证实，维持初压组累积无痛生存率显著优于非维持初压组，充分体现初压维持策略对长期疗效的提升作用。其原因可能在于决定 PBC 长期疗效的关键并非某一瞬时的压力峰值，而是整个压迫周期内神经节实际承受的“有效压迫剂量”。当前研究证明[23][24] PBC 会引起粗大有髓神经纤维脱髓鞘，这是治疗 TN 的关键；Bayron 等[25]也指出脱髓鞘可能引起电压门控钠通道阻滞，从而影响治疗效果。Li 等[26]研究结果进一步表明，神经轴突损伤及脱髓鞘程度与压迫时长呈正相关，PBC 术后修复信号的启动不随压迫剂量增加而增强。这不仅从分子层面为这一猜想做了解释，同时为术后早期复发提供了可靠的病理根源。

非维持初压组术中压力迅速衰减，累计力学刺激不足，可能仅引发局灶性髓鞘水肿等可逆性损伤，损伤后修复任务量小，轴突再生与痛觉通路重建可在较短时间内完成。而维持初压组通过主动补充压力，使粗大有髓神经纤维在整个压迫窗口期持续暴露于超阈值力学环境，诱导广泛轴突破裂与髓鞘崩解[26]。由于修复信号强度恒定，更深的损伤意味着更长的修复周期，无痛生存期因而显著后移。

5.4. 术后并发症

本研究观察到一个关键临床现象：维持初压组术后长期疗效显著优于非维持初压组，但术后 3 个月面部麻木发生率(63.30%)显著高于非维持初压组(36.80%)($\chi^2=7.361, P=0.007$)。我们为解释这种“远期高疗效”与“中期高麻木率”并存的现象，结合术中压力动态监测数据与神经损伤基础研究[26][27]，整理出“基于术中压力维持策略的三叉神经节损伤连续谱”(表 7)。该框架认为，PBC 的长期疗效根本上取决于球囊在整个压迫周期内施加于神经节的“有效力学剂量”，不同的压力模式(快速衰减 vs. 稳定维持)将导致本质不同的微观病理损伤类型，进而决定神经再生潜能与临床结局。

非维持初压组主要产生 I 型损伤，因此该组术后早期疼痛缓解率与维持初压组无显著差异；但随着神经功能快速修复，疼痛复发率逐渐升高，同时面部感觉恢复较快，术后 3 个月面部麻木发生率仅 36.80%。维持初压组显著增加了 II 型损伤的比例——这种损伤足以长期中断痛觉传导，使该组获得更优的长期疗效；同时，感觉纤维再生过程缓慢且不完全，导致术后 3 个月面部麻木发生率高达 63.30%。这一现象并非技术缺陷，而是初压维持策略作用机制的必然体现，揭示了 PBC 治疗中“疗效”与“感觉保留”之间存在固有“矛盾”。这一现象在既往国内外研究中均有观察[28]-[31]：PBC 术后面部麻木发生率显著高于微血管减压术，但多为暂时性，且与长期镇痛效果呈正相关趋势。

同时我们观察到，维持初压组与非维持初压组在术后咀嚼肌无力(2.00% vs. 3.50%, $P=1.000$)发生率上无显著差异，提示初压维持策略未增加运动纤维损伤风险。结合当前研究现状，其原因我们推测如下：

其一“解剖豁免”，三叉神经运动纤维仅存在于下颌支(V3)，其胞体位于三叉神经运动核(脑桥)，周围突经卵圆孔出颅，支配咀嚼肌群[32][33]。PBC术中球囊的目标靶区是位于Meckel腔内的三叉神经半月节(感觉神经元胞体聚集区)及三叉神经感觉根，而运动根在感觉根的内侧、前方走行，且在进入卵圆孔前已与下颌支感觉纤维汇合，其位置相对远离球囊扩张时对感觉根施压的核心区域[34]。因此，运动纤维均不易直接承受球囊扩张所致的集中机械应力。其二运动纤维的特异性，Fu等[35]研究表明两种术式的患者术后咀嚼肌无力发生率无显著差异；Bergenheim等[36]系统综述指出，压迫时间缩短可在保证疗效同时，降低咀嚼肌无力等并发症发生率。这可能提示运动纤维损伤具有明确的“剂量-效应”关系，本研究中两组压迫时长均在临床常规范围(约2分钟)，即使维持初压组累计力学剂量更高，但仍未跨越诱导运动纤维不可逆损伤的临界点。

Table 7. The continuous spectrum of trigeminal ganglion injury based on intraoperative pressure maintenance strategies
表 7. 基于术中压力维持策略的三叉神经节损伤连续谱

损伤类型与特征	与非维持策略的关联	与维持策略的关联	对应的临床结局
I型：轻度可逆性损伤	主导。压力衰减快，力学刺激不足，电镜下主要表现为局灶性髓鞘水肿、轻度脱髓鞘，轴突连续性保存。	极少发生。	早期疼痛缓解，但髓鞘修复迅速，随着痛觉传导通路重建，可能复发；面部感觉快速恢复。
II型：中重度轴索损伤	部分发生。	主导之一。压力稳定维持，累计力学剂量充足。电镜下可见广泛轴突破裂、轴浆空泡化、髓鞘板层分离、消化腔形成。	持久的疼痛缓解。轴突再生需启动完整瓦勒变性程序，再生距离长、耗时长；无痛生存期显著延长，感觉功能恢复相应延迟。

5.5. 压力维持过程中的球囊形态变化与潜在风险

本研究中的压力维持策略要求术中动态调控，为补偿因组织顺应性所致的压力衰减，维持初压组患者术中追加的造影剂量约为0.05~0.15 mL。这一微量追加旨在精确维持力学环境，而非显著改变球囊容积。相关研究指出[13]，当球囊置于Meckel腔内充盈后，其最终形态主要受Meckel腔本身以及三叉神经孔的解剖形态所制约，若囊内压力过高，球囊可能因过度扩张而呈现“类球形”，或部分经三叉神经孔疝入后颅窝而形成“哑铃形”。值得注意的是，本研究中维持初压组尽管在压力维持期间追加了微量造影剂，动态影像监测(图1)显示球囊形态虽随压力维持略有扩张，但仍保持典型的“梨形”，未出现向上述异常形态的显著转变，如图2所示。我们认为，这一结果可能源于本研究设定的压力维持范围(初压的±5%)所对应的压力与容积增量，尚未达到使Meckel腔硬膜壁发生塑性变形或球囊明显向后颅窝溢出的生物力学阈值。Meckel腔作为硬膜构成的纤维性腔隙，其周壁及相邻的岩骨嵴等骨性结构形成了有效的解剖约束，在本研究参数下足以将球囊限制于腔内，从而维持其理想的“梨形”形态。

本研究提出主动维持压力的策略，同时也引出其关键的安全考量：即需防范因压力维持过程中球囊容积不当增加所带来的机械应力风险。尽管本研究未发生严重并发症，但理论上，若术中球囊位置放置不理想，为维持压力而过度追加造影剂，可能导致球囊容积超出形成初始“梨形”所需的最佳范围，使其形态转为“圆形”或“哑铃形”。这不仅可能降低对半月神经节的选择性压迫效率，还会显著增加对Meckel腔顶壁(海绵窦)、内侧壁(颈内动脉)及后壁(脑干腹侧面)的局部压强。现有文献表明[37]，球囊过度充盈是术后发生顽固性麻木、咀嚼肌无力乃至罕见的海绵窦综合征(如复视)的重要原因之一。Meckel腔的生理性承压上限尚未被明确界定，因此，维持初压策略的安全性与有效性很大程度上取决于术者的经验，以及术中球囊定位与造影剂微量调节的精确性。



Figure 2. Intraoperative balloon morphology
图 2. 术中球囊形态

6. 研究局限性与未来展望

本研究存在以下局限性：首先，作为单中心回顾性研究，患者分组基于术中的压力管理策略，尽管两组基线资料可比，但非随机化的分组方式仍可能引入无法测量的选择偏倚，例如术中对压力衰减程度的初始判断可能无意中影响了策略的选择。其次，随访时间最长 25 个月，仍需更长期的随访(如 5 年)以确认疗效的持久性。第三，我们采用了统一的维持策略，未来研究可探索不同压力维持阈值(如维持在初压的 105% vs. 110%)和不同维持时长的“剂量 - 效应”关系，以寻找疗效与安全性之间的最优点。

未来展望：第一，术中神经功能实时监测体系的构建。目前 PBC 术中压力监测已实现动态记录[38]，但“充分损伤痛觉纤维”与“过度损伤运动根”之间的安全边界尚未建立，未来研究应探索诱发 II 型损伤所需的最低电生理阈值，明确“有效压迫剂量”的功能学终点，为术中压力补充时机与幅度提供实时调控依据，从而在保障长期疗效的同时规避咀嚼肌无力等并发症风险。第二，基于 Meckel 腔个体化解剖的精准压迫方案。随着影像学技术的发展，不断有研究证实不同患者 Meckel 腔容积、形态及顺应性存在显著个体差异[39] [40]，但当前 PBC 术中压力、球囊容积及压迫时长的设定仍依赖术者经验，缺乏术前解剖参数指导。未来我们会探索如何根据术前 Meckel 腔三维重建来有效预测术中球囊容积需求，并为个体化压力设定提供解剖学依据。

7. 结论

经皮三叉神经球囊压迫术中采用初压维持策略，可有效减少术中压力流失，为三叉神经节提供持续、稳定的有效压迫，在不增加术后严重并发症发生风险的前提下，显著提升患者术后 1 年、24 个月疼痛缓解率，降低疼痛复发风险，延长无痛生存时间；尽管其会导致术后 3 个月面部麻木发生率略有升高，但该并发症多为轻中度、暂时性，具有良好的临床可接受性。综上所述，术中初始压力维持策略是一种具备安全性与有效性的 PBC 术中压力管理方案，或可为手术策略的优化提供潜在价值。

基金项目

吉林省教育厅科学研究项目(JJKH20250821KJ)：三叉神经痛球囊压迫术的长期疗效分析与临床研究。

参考文献

- [1] Adams, H., Pendleton, C., Latimer, K., Cohen-Gadol, A.A., Carson, B.S. and Quinones-Hinojosa, A. (2011) Harvey Cushing's Case Series of Trigeminal Neuralgia at the Johns Hopkins Hospital: A Surgeon's Quest to Advance the Treatment of the 'Suicide Disease'. *Acta Neurochirurgica*, **153**, 1043-1050. <https://doi.org/10.1007/s00701-011-0975-8>
- [2] Haviv, Y., Khan, J., Zini, A., Almozino, G., Sharav, Y. and Benoliel, R. (2015) Trigeminal Neuralgia (Part I): Revisiting the Clinical Phenotype. *Cephalalgia*, **36**, 730-746. <https://doi.org/10.1177/0333102415611405>
- [3] Pergolizzi Jr, J.V., LeQuang, J.A., El-Tallawy, S.N., Wagner, M., Ahmed, R.S. and Varrassi, G. (2024) An Update on Pharmacotherapy for Trigeminal Neuralgia. *Expert Review of Neurotherapeutics*, **24**, 773-786. <https://doi.org/10.1080/14737175.2024.2365946>
- [4] Bendtsen, L., Zakrzewska, J.M., Heinskou, T.B., Hodaie, M., Leal, P.R.L., Nurmikko, T., et al. (2020) Advances in Diagnosis, Classification, Pathophysiology, and Management of Trigeminal Neuralgia. *The Lancet Neurology*, **19**, 784-796. [https://doi.org/10.1016/s1474-4422\(20\)30233-7](https://doi.org/10.1016/s1474-4422(20)30233-7)
- [5] Holste, K., Chan, A.Y., Rolston, J.D. and Englot, D.J. (2020) Pain Outcomes Following Microvascular Decompression for Drug-Resistant Trigeminal Neuralgia: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Neurosurgery*, **86**, 182-190. <https://doi.org/10.1093/neuros/nyz075>
- [6] Hughes, M.A., Jani, R.H., Fakhran, S., Chang, Y., Branstetter, B.F., Thirumala, P.D., et al. (2019) Significance of Degree of Neurovascular Compression in Surgery for Trigeminal Neuralgia. *Journal of Neurosurgery*, **133**, 411-416. <https://doi.org/10.3171/2019.3.jns183174>
- [7] Chen, L., Shang, Y., Zhang, Y. and Zhao, Y. (2023) Endoscopic Microvascular Decompression Versus Microscopic Microvascular Decompression for Trigeminal Neuralgia: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Clinical Neuroscience*, **117**, 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2023.09.009>
- [8] Montano, N., Menna, G., Musarra, A., Martinelli, R., Izzo, A., D'Alessandris, Q.G., et al. (2024) A Systematic Review on the Efficacy of Adjunctive Surgical Strategies during Microvascular Decompression for Trigeminal Neuralgia without Intraoperative Evidence of Neurovascular Conflict. *Neurosurgical Review*, **47**, Article No. 276. <https://doi.org/10.1007/s10143-024-02498-7>
- [9] Zhong, J. (2023) The Key to a Successful PBC in Treatment of Trigeminal Neuralgia. In: *Acta Neurochirurgica Supplement*, Springer, 161-165. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36084-8_26
- [10] Leidinger, A., Muñoz-Hernandez, F. and Molet-Teixidó, J. (2018) Absence of Neurovascular Conflict during Microvascular Decompression While Treating Essential Trigeminal Neuralgia. How to Proceed? Systematic Review of Literature. *Neurocirugia (English Edition)*, **29**, 131-137. <https://doi.org/10.1016/j.neucie.2018.02.001>
- [11] Du, Y., Shi, H., Xi, Z., Wang, Y., Guo, W. and Qian, T. (2025) Percutaneous Balloon Compression Exerts Multidimensional Efficacy in Trigeminal Neuralgia via Neuroinflammation and Neurotransmitter Regulation. *World Neurosurgery*, **205**, Article 124685. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2025.124685>
- [12] Shi, Y., Liu, W., Peng, S. and Liu, J. (2025) Percutaneous Balloon Compression, a Better Choice for Primary Trigeminal Neuralgia Compared to Microvascular Decompression? *Frontiers in Surgery*, **11**, Article 1517064. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2024.1517064>
- [13] Sun, C., Zheng, W., Zhu, Q., Du, Q. and Yu, W. (2021) The Transformation of the Balloon Shape in Percutaneous Balloon Compression for Trigeminal Neuralgia. *Journal of Pain Research*, **14**, 3805-3814. <https://doi.org/10.2147/jpr.s343783>
- [14] Guo, W., Du, Y., Yang, L., Wang, Y., Shi, H., Shen, S., et al. (2024) Predicting Balloon Shape in Percutaneous Micro-compression: An Observational Comparative Analysis of Meckel's Cave Imaging and Balloon Morphology. *Neurosurgical Review*, **47**, Article No. 276. <https://doi.org/10.1007/s10143-024-02382-4>
- [15] Ding, Y., Wang, Y., Wang, Y. and Dong, J. (2023) A Retrospective Study to Examine the Association of Different Pear-Shaped Balloons with Efficacy and Postoperative Complications in Percutaneous Balloon Compression for Trigeminal Neuralgia. *Neurosurgical Review*, **46**, Article No. 60.
- [16] Verma, M.M., Paswan, A.K., Prakash, S. and Bhalekar, A. (2024) A Randomized Controlled Trial Comparing the Effect of Two-Time Durations of Balloon Compression during Percutaneous Balloon Compression in Resistant Trigeminal Neuralgia. *Pain Physician Journal*, **27**, 21-26.
- [17] 彭绍鹏, 刘建雄, 王飞, 张宏星, 张坚. PBC 治疗三叉神经痛术中球囊压力与术后并发症、复发的关系研究[J]. 中华神经医学杂志, 2022, 21(2): 152-156.
- [18] 种玉龙, 徐武, 王晶, 姜成荣, 梁维邦. 三叉神经痛微球囊压迫术后无效或短期内复发的原因及处理策略[J]. 中华外科杂志, 2022, 60(5): 472-477.
- [19] Shi, J., Bo, F., Pan, R., Zhang, Y., Xu, Y., Chen, H., et al. (2022) Research on the Relationship between Meckel's Cavity

- Shape, Balloon Shape, and Intracapsular Pressure during Percutaneous Balloon Compression. *World Neurosurgery*, **168**, e369-e375. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2022.10.033>
- [20] Wang, Q., Chen, C., Guo, G., Li, Z., Huang, D. and Zhou, H. (2021) A Prospective Study to Examine the Association of the Foramen Ovale Size with Intraluminal Pressure of Pear-Shaped Balloon in Percutaneous Balloon Compression for Trigeminal Neuralgia. *Pain and Therapy*, **10**, 1439-1450. <https://doi.org/10.1007/s40122-021-00311-7>
- [21] Ma, Y., Yao, G., Wang, H., Huang, Z., Dou, N., Li, S., et al. (2025) The Key to Percutaneous Balloon Compression Success: Pear or Banana? *World Neurosurgery*, **199**, Article 124124. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2025.124124>
- [22] Wang, Q., Ni, Y., Li, K., Chen, C., Huang, D. and Zhou, H. (2024) Perioperative Evaluation and Monitoring of Percutaneous Balloon Compression in Treatment of Trigeminal Neuralgia. *Operative Neurosurgery*, **29**, 263-270. <https://doi.org/10.1227/ons.0000000000001447>
- [23] Cruccu, G., Di Stefano, G. and Truini, A. (2020) Trigeminal Neuralgia. *New England Journal of Medicine*, **383**, 754-762. <https://doi.org/10.1056/nejmra1914484>
- [24] Ziyal, I.M. and Özgen, T. (2007) Microanatomy of the Central Myelin-Peripheral Myelin Transition Zone of the Trigeminal Nerve. *Neurosurgery*, **60**, E582. <https://doi.org/10.1227/01.neu.0000255367.19228.c4>
- [25] Valenzuela Cecchi, B., Figueroa, F., Contreras, L., Bustos, P. and Maldonado, F. (2023) Percutaneous Balloon Compression for the Treatment of Trigeminal Neuralgia: A Review of 10 Years of Clinical Experience. *Cureus*, **15**, e43645. <https://doi.org/10.7759/cureus.43645>
- [26] Liu, Y., Li, F., Han, S., Ma, Y., Yi, F. and Xu, X. (2014) Optimal Duration of Percutaneous Microballoon Compression for Treatment of Trigeminal Nerve Injury. *Neural Regeneration Research*, **9**, 179-189. <https://doi.org/10.4103/1673-5374.125347>
- [27] Brown, J.A., Hoeflinger, B., Long, P.B., Gunning, W.T., Rhoades, R., Bennett-Clarke, C.A., et al. (1996) Axon and Ganglion Cell Injury in Rabbits after Percutaneous Trigeminal Balloon Compression. *Neurosurgery*, **38**, 993-1004. <https://doi.org/10.1097/00006123-199605000-00028>
- [28] Zhou, Y., Dou, N., Liu, X., Wang, H. and Zhong, J. (2023) A Comparative Review of the Outcome Following MVD and PBC in Patients with Trigeminal Neuralgia. *Journal of Neurological Surgery Part A: Central European Neurosurgery*, **84**, 470-476. <https://doi.org/10.1055/a-1994-7956>
- [29] Hajikarimloo, B., Mohammadzadeh, I., Didehvar, K., Bahrami Zanjanbar, D., Haghshenas, M., Zare, E., et al. (2025) Microvascular Decompression versus Percutaneous Balloon Compression for Trigeminal Neuralgia: A Systematic Review and Meta-Analysis of Double-Arm Studies. *Neurological Research*, **2025**, 1-16. <https://doi.org/10.1080/01616412.2025.2602716>
- [30] Nascimento, R.F.V., Pipek, L.Z. and de Aguiar, P.H.P. (2023) Is Percutaneous Balloon Compression Better than Microvascular Decompression to Treat Trigeminal Neuralgia? A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Clinical Neuroscience*, **109**, 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2023.01.002>
- [31] Ji, Y. and Wang, J. (2024) Comparison of Microvascular Decompression and Percutaneous Balloon Compression Efficacy in Patients with V2 Idiopathic Trigeminal Neuralgia. *Frontiers in Neurology*, **15**, Article 1406602. <https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1406602>
- [32] Yu, M., Jozsa, F. and Donohoe, C. (2025) Neuroanatomy, Semilunar Ganglion. StatPearls Publishing.
- [33] Xu, Y., El Ahmadieh, T.Y., Nunez, M.A., Zhang, Q., Liu, Y., Fernandez-Miranda, J.C., et al. (2023) Refining the Anatomy of Percutaneous Trigeminal Rhizotomy: A Cadaveric, Radiological, and Surgical Study. *Operative Neurosurgery*, **24**, 341-349. <https://doi.org/10.1227/ons.0000000000000590>
- [34] 丁滢滢, 纪荣明, 胡旭, 向定朝, 石立科, 施栋良, 代飞虎, 齐明, 董吉荣. Meckel 囊在经皮穿刺球囊压迫术治疗三叉神经痛中的应用解剖[J]. 解剖学杂志, 2022, 45(5): 397-401.
- [35] Fu, L., Liu, Z., Bu, H., Lu, Z., Kong, C., Wang, T., et al. (2024) The Extracapsular Capsule Phenomenon of Percutaneous Balloon Compression Provides Adequate Compression of the Third Branch of the Trigeminal Nerve: A Retrospective Study. *Neurosurgical Review*, **47**, Article No. 499. <https://doi.org/10.1007/s10143-024-02711-7>
- [36] Bergenheim, A.T., Asplund, P. and Linderöth, B. (2013) Percutaneous Retrogasserian Balloon Compression for Trigeminal Neuralgia: Review of Critical Technical Details and Outcomes. *World Neurosurgery*, **79**, 359-368. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2012.03.014>
- [37] 罗成, 张勇, 罗国轩, 王墨. 经皮微球囊压迫半月节治疗三叉神经痛的研究进展[J]. 中国临床神经外科杂志, 2019, 24(6): 371-374+377.
- [38] Xia, Y., Yu, G., Min, F., Xiang, H., Huang, J. and Leng, J. (2022) The Focus and New Progress of Percutaneous Balloon Compression for the Treatment of Trigeminal Neuralgia. *Journal of Pain Research*, **15**, 3059-3068. <https://doi.org/10.2147/jpr.s374433>
- [39] Li, H., Li, B., Zhang, C., Xiao, R., He, L., Li, S., et al. (2024) A Combined Radiomics and Anatomical Features Model

-
- Enhances MRI-Based Recognition of Symptomatic Nerves in Primary Trigeminal Neuralgia. *Frontiers in Neuroscience*, **18**, Article 1500584. <https://doi.org/10.3389/fnins.2024.1500584>
- [40] Hu, J., Deng, K., Yang, H., Jiang, B., Zhang, H., Guo, H., *et al.* (2023) Pre-Operative MRI Measurement of the Meckel's Cave Volume in Percutaneous Balloon Compression of the Trigeminal Nerve. *The British Journal of Radiology*, **96**, Article 20220350. <https://doi.org/10.1259/bjr.20220350>