

折叠式球囊巩膜外加压与传统巩膜扣带术治疗实验性视网膜脱离的疗效比较

董毅凡^{1,2}, 张百珂², 贾 雍², 杨 帆², 郭丽莎², 张向阳², 卢 聪², 张中浩², 武海燕²,
田学敏²

引用: 董毅凡, 张百珂, 贾雍, 等. 折叠式球囊巩膜外加压与传统巩膜扣带术治疗实验性视网膜脱离的疗效比较. 国际眼科杂志, 2025, 25(10): 1566-1573.

基金项目: 河南省自然科学基金项目(No. 202300420066)

作者单位:¹(453000)中国河南省新乡市,河南医药大学;
²(450000)中国河南省郑州市,中国人民解放军联勤保障部队第九八八医院眼科

作者简介: 董毅凡,男,硕士研究生,研究方向:眼底病。

通讯作者: 田学敏,男,博士,主任医师,硕士研究生导师,研究方向: 晶状体病、眼底病. 13949005500@163.com

收稿日期: 2025-05-10 修回日期: 2025-08-27

摘要

目的: 比较折叠式球囊(FCB)巩膜外加压术和传统巩膜扣带术(SB)治疗实验性视网膜脱离模型的疗效。

方法: 成功建立孔源性视网膜脱离(RRD)动物模型后,将24只新西兰大白兔随机分为3组(RRD模型组、SB组、FCB组),每组8只。SB组和FCB组对造模成功的RRD动物模型进行SB和FCB巩膜外加压术,RRD模型组只建立RRD动物模型,观察期内不进行任何手术操作,术后观察期为3mo。采用新生儿广域眼底成像系统和眼科B超评估手术前后眼底情况,采用眼压计Icare®TONOVET Plus评估手术前后眼压变化情况,采用Eaton和Draize评分评估术后炎症反应情况。

结果: FCB组和SB组术后视网膜的复位率分别为87.5%和75.0%,组间无差异($P>0.05$)。FCB组和SB组术后眼压均较术前上升($P<0.01$),且观察期各时间点的眼压均无组间差异($P>0.05$)。RRD模型组的眼压在观察期均保持较低的状态。FCB组的平均手术时间为 16.87 ± 2.29 min短于SB组的平均手术时间 46.25 ± 4.74 min($t=-15.166$, $P<0.001$)。根据Eaton和Draize评分系统显示,FCB组术后早期结膜充血分级及结膜水肿分级均低于SB组,炎症反应更轻($P<0.05$)。

结论: FCB巩膜外加压术和SB均能有效治疗实验性RRD。与SB相比,FCB巩膜外加压术操作简单、手术时间短,显著降低手术创伤及炎症风险。

关键词: 孔源性视网膜脱离; 折叠式球囊; 巩膜扣带术; 实验性视网膜脱离

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2025.10.04

Efficacy comparison of foldable capsular body with scleral buckling in treating experimental retinal detachment

Dong Yifan^{1,2}, Zhang Baike², Jia Yong², Yang Fan², Guo Lisha², Zhang Xiangyang², Lu Cong², Zhang Zhonghao², Wu Haiyan², Tian Xuemin²

Foundation item: Natural Science Foundation of Henan Province (No.202300420066)

¹Henan Medical University, Xinxiang 453000, Henan Province, China; ²Department of Ophthalmology, the 988th Hospital of Joint Logistic Support Force of the People's Liberation Army, Zhengzhou 450000, Henan Province, China

Correspondence to: Tian Xuemin. Department of Ophthalmology, the 988th Hospital of Joint Logistic Support Force of the People's Liberation Army, Zhengzhou 450000, Henan Province, China. 13949005500@163.com

Received: 2025-05-10 Accepted: 2025-08-27

Abstract

• AIM: To compare the effectiveness of foldable capsular body (FCB) with traditional scleral buckling (SB) in the treatment of experimental retinal detachment animal models.

• METHODS: After successfully establishing rhegmatogenous retinal detachment (RRD) animal models, 24 New Zealand white rabbits were randomly divided into three groups (RRD models group, SB group, and FCB group), with 8 rabbits in each group. The FCB and SB groups underwent SB and FCB surgeries for the RRD animal models, while the RRD models group only consists of RRD models without any surgical intervention during the follow-up period. The follow-up duration was 3 mo. Wide-field neonatal fundus imaging system and ophthalmic B-ultrasound were used to assess the fundus conditions before and after surgery. The Icare®TONOVET Plus tonometer was utilized to evaluate intraocular pressure changes before and after surgery. The Eaton and Draize scoring systems were selected to monitor postoperative inflammatory reactions.

• RESULTS: The retinal reattachment rates in the FCB and SB groups were 87.5% and 75.0%, respectively, with no statistically significant difference between the groups ($P>0.05$). The intraocular pressure in both the FCB and SB groups increased postoperatively compared to

preoperative levels ($P < 0.01$), and there were no significant differences in intraocular pressure at any time points during the follow-up period between the groups ($P > 0.05$). The intraocular pressure in the RRD models group remained at a low level throughout the follow-up period. The average surgical time for the FCB group was 16.87 ± 2.29 min, which was shorter than 46.25 ± 4.74 min in the SB group ($t = -15.166$, $P < 0.001$). According to the Eaton and Draize scoring systems, the FCB group had lower grades of conjunctival hyperemia and edema in the early postoperative period compared to the SB group, indicating milder inflammatory reactions ($P < 0.05$).

• CONCLUSION: Both FCB and SB are effective in treating experimental RRD. Compared to SB, FCB is simpler to operate, and also has a shorter surgical time and milder postoperative inflammatory reactions.

• KEYWORDS: rhegmatogenous retinal detachment; foldable capsular body; scleral buckling; experimental retinal detachment

Citation: Dong YF, Zhang BK, Jia Y, et al. Efficacy comparison of foldable capsular body with scleral buckling in treating experimental retinal detachment. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)*, 2025, 25 (10): 1566–1573.

0 引言

孔源性视网膜脱离 (rhegmatogenous retinal detachment, RRD) 是导致不可逆视力损伤的急症, 其核心病理机制为视网膜裂孔形成后液化的玻璃体进入视网膜下间隙^[1-2]。RRD 全球年发病率约为 1/10000, 且呈逐年上升趋势, 高危因素包括年龄、高度近视等^[3]。手术封闭裂孔是治疗关键^[4-5]。传统巩膜扣带术 (scleral buckling, SB) 作为 RRD 的经典手术方式已有 70 a 左右的历史, 该手术方式的核心原理是在巩膜表面植入外源性材料加压裂孔区域的巩膜, 从而达到封闭裂孔目的。但该方法手术创伤大、术后炎症反应重^[6]。近年来, 睫状体平坦部玻璃体切割术 (pars plana vitrectomy, PPV) 在治疗 RRD 上显示出较好疗效, 该方法通过眼内入路直接解除玻璃体牵拉, 同时眼内填充物如膨胀气体、硅油等辅助顶压视网膜达到闭合裂孔、复位视网膜的目的, 但 PPV 会破坏眼球的自身代谢, 从而增加白内障及继发性青光眼等的发病风险^[7]。有研究提出单纯 RRD 应优先选择外路手术以最大程度保留自身玻璃体^[8-9]。折叠式球囊 (foldable capsular body, FCB) 巩膜外加压术通过微创切口植入可调节球囊, 利用定向压力封闭裂孔, 该方法切口小、手术时间短、操作步骤简单^[10-11]。我们的既往研究也显示 FCB 巩膜外加压术单次手术成功率达 89.2%, 且术后炎症反应显著轻于 SB^[12], 但其疗效仍需动物实验进一步验证。动物模型是评估手术技术转化潜力的重要工具。兔眼因玻璃体容积大、视网膜结构清晰, 可精准模拟 RRD 进展。本研究通过透明质酸酶诱导联合液流冲击法构建兔 RRD 模型, 对比 FCB 巩膜外加压术与 SB 的视网膜复位率、手术时间、眼压变化及炎症反应, 旨在明确以下内容: (1) FCB 巩膜外加压术是否具有与 SB 相当的解剖复位效果; (2) FCB 巩膜外加压术的微创优势是否降低术后并发症风险; (3) 两种术式对

眼内稳态的短期影响差异。

1 材料和方法

1.1 材料

1.1.1 实验动物 选取 24 只健康新西兰大白兔, 4 月龄, 体质量 2.0–2.5 kg, 雌雄各半。动物实验过程按照 ARVO 眼科和视力研究动物使用声明和 ARRIVE 指南 2.0 进行。实验期间实验动物于昼夜 12 h 的房间内独立饲养, 饲养温度 20–23 °C, 所有实验动物给予等量充足食水。本实验流程经中国人民解放军联勤保障部队第九八八医院伦理委员会审查批准(编号:988YY20230030LLSP)。

1.1.2 实验材料及仪器 新生儿广域眼底成像系统(中山鑫马, 中国广州), 手持裂隙生物显微镜(美沃, 中国上海), 眼科 B 型超声诊疗仪(迈达, 中国天津), 手持回弹式眼压计 (ICARE, 芬兰), 高倍手术显微镜 (TOPCON, 日本), 动物实验手术台(豪湃生物, 中国郑州), 50°凹面接触式眼底镜(朗格利, 中国苏州), 透明质酸酶(索莱宝, 中国北京), 盐酸氯胺酮注射液(汉丰, 中国西安), 盐酸赛拉嗪注射液(哈曼格, 中国上海)。折叠式顶压球囊-8 (foldable capsular buckle-8, FCB-8) (卫视博, 中国广州), 硅胶带(S-120, 卫视博, 中国广州), 见图 1。

1.2 方法

1.2.1 兔眼 RRD 模型的建立 新西兰兔使用盐酸氯胺酮 (25 mg/mL, 1 mL/kg) 和盐酸赛拉嗪 (2 mg/kg) 混合物肌肉注射进行全身麻醉^[13], 全身麻醉后置于实验动物台上, 复方托吡卡胺滴眼液点眼散瞳, 硫酸庆大霉素注射液冲洗结膜囊, 将 50°凹面角膜接触眼底镜置于兔眼角膜观察眼底情况, 确定拟造孔位置; 于兔眼 8:00 方向距离角膜缘 1.5 mm 处为巩膜穿刺点, 用装有透明质酸酶溶液的 1 mL 注射器穿刺巩膜, 注射器针头指向兔眼的 11:00 方向, 针头到达距离视盘 3 PD 的视网膜处, 靠近但不接触视网膜, 将注射器中 0.2 mL (3 000 U) 的透明质酸酶注入视网膜表面, 抽取玻璃体 0.2 mL 再缓慢推入, 反复 3–5 次, 最后抽取 0.3 mL 玻璃体快速冲击视网膜, 借助高速液流冲破视网膜、形成视网膜裂孔^[14-15], 术后用镊子和棉签按压切口, 点抗生素眼药后操作结束(图 2)。造模后第 1 d 观测兔眼情况, 眼底照相观察到视网膜裂孔及视网膜隆起, 无眼底出血, 眼科 B 型超声诊疗仪提示眼底视网膜脱离, 眼前节检查未发现外伤性白内障者, 视为 RRD 动物模型建立成功。

1.2.2 实验动物分组及处理 将成功建立 RRD 动物模型的 24 只新西兰兔随机分为 3 组, 每组 8 只。RRD 动物模型组随访期间只接受眼科检查、不做其他任何操作; SB 组在 RRD 动物模型建立后第 3 d 时进行 SB 手术。操作方法: 麻醉成功后充分暴露术眼, 散瞳后于右眼 9:00 至 3:00 位沿角膜缘环形剪开结膜囊, 分离结膜、暴露眼外肌, 1 mL 注射器针头穿刺巩膜放出视网膜下液约 0.3 mL, 冷冻封闭裂孔, 缝合放液孔, 将硅胶带穿过兔眼上直肌及外直肌, 用 5–0 缝线“8”字缝合固定于角膜缘后 7 mm 处巩膜上。对位缝合巩膜及结膜, 见图 3。

FCB 组在 RRD 动物模型建立后第 3 d 进行 FCB 巩膜外加压术。操作方法: 麻醉成功后于兔眼颞上方 11:00 方向, 定位裂孔。沿裂孔所在方向角膜缘后 3 mm、平行于角

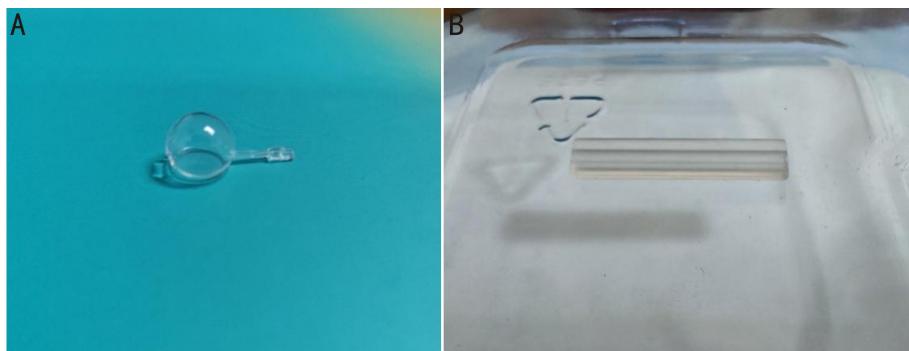


图 1 植入物 A:FCB-8;B:S-120 硅胶带,长约 2.4 cm,宽约 0.5 cm。

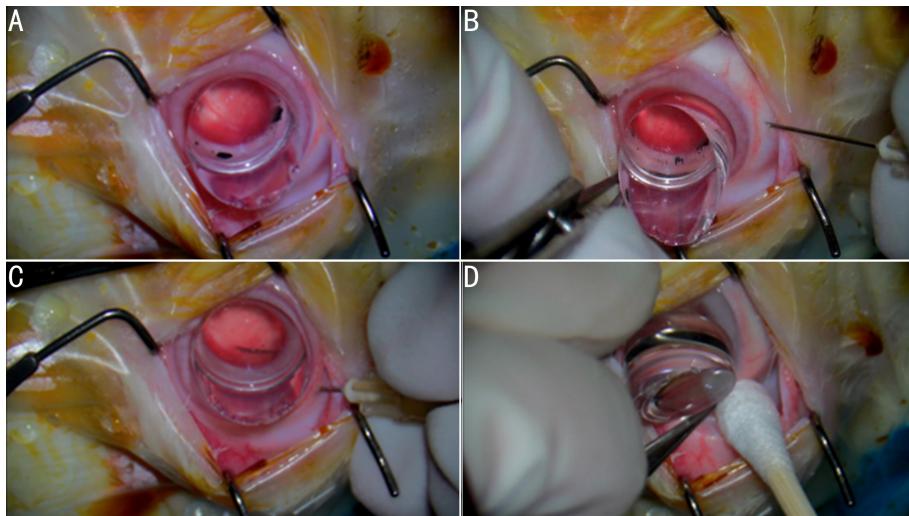


图 2 RRD 动物模型建立手术操作过程 A:用角膜接触镜确定拟造孔位置(兔眼颤上方距离视盘 3 PD 处);B:兔眼颤下方 8:00 方向距离角膜缘 1.5 mm 处穿刺巩膜;C:1 mL 注射器穿刺进入玻璃体腔,针头指向 11:00 位,不断靠近视网膜但不接触,液化局部玻璃体;D:操作完毕后用镊子和棉签按压穿刺口。

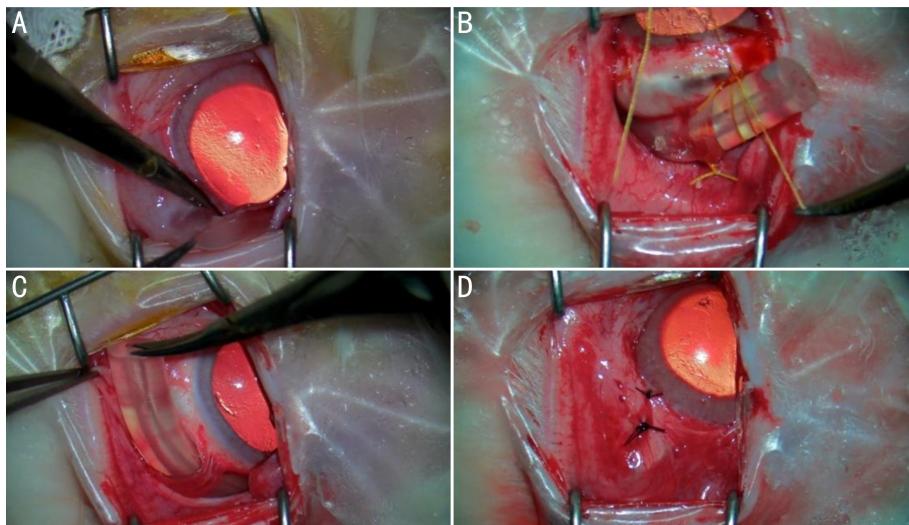


图 3 SB 手术操作过程 A:9:00 至 3:00 位沿角膜缘环形剪开结膜囊,分离结膜,暴露上直肌、外直肌;B:将硅胶带穿过直肌放置在巩膜表面;C:用 5-0 线“8”字缝合将硅胶带固定于角膜缘后 7 mm 处巩膜上;D:术后缝合结膜切口。

膜缘方向剪开球结膜,切口长约 4 mm,分离球结膜下组织直达巩膜。沿巩膜表面向后分离约 10~12 mm 长的隧道口,1 mL 注射器针头穿刺巩膜放出视网膜下液约 0.3 mL,冷冻封闭裂孔,缝合放液孔,将 FCB-8 抽真空后折叠,球面朝向巩膜面,沿预制隧道置入球囊,使用 5-0 缝线在角膜缘后 5~7 mm 固定球囊引流管,经引流阀注入无菌生理盐水,检查 FCB 组对应的巩膜压陷良好,进一步加扎固定全部引流管,将 FCB 引流阀横行折入球筋膜下,对位缝合

结膜切口,见图 4。

1.2.3 术后评估

1.2.3.1 眼底照相及 B 超检查 术后使用新生儿广域眼底成像系统及眼科 B 型超声仪对每组新西兰兔进行检查,评估兔眼眼底变化情况以及视网膜复位情况。

1.2.3.2 眼压检查 于术后 3、7、14、30、60、90 d 使用手持眼压计测量每组新西兰兔眼压,连续测量 6 次后取平均值作为最终眼压。

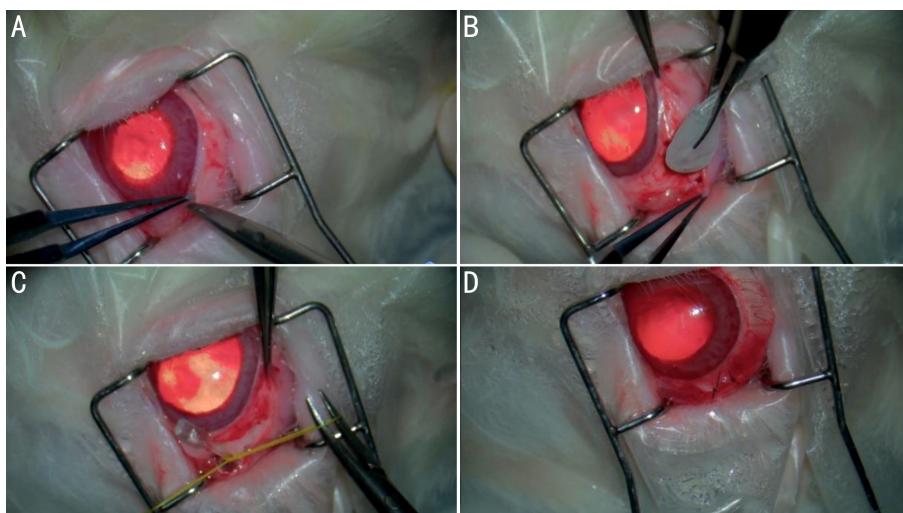


图 4 FCB 巩膜外加压手术操作过程 A:沿裂孔所在方向角膜缘后 3 mm、平行于角膜缘方向剪开球结膜,切口长约 4 mm,分离球结膜下组织直达巩膜;B:将 FCB-8 抽真空后折叠,球面朝向巩膜面,沿预先做好的隧道置入球旁;C:5-0 不可吸收缝线在角膜缘后 5-7 mm 固定球囊引流管;D:术毕缝合结膜切口。

1.2.3.3 眼前节检查 手术后 3、7、14、30、60、90 d 使用手持裂隙生物显微镜检查兔眼眼前节(包括角膜、结膜、巩膜、前房),根据 Eaton 评分系统和 Draize 评分标准来评估眼前节的炎症反应。包括结膜充血,结膜水肿,前房炎症,角膜血管化。

结膜充血分级:0 级为球结膜外观正常。可观察到浅粉色小血管,主要位于角膜缘或角膜缘附近;1 级为可见粉红色至红色球结膜血管,分支极少,从角膜缘向结膜后穹窿延伸 1-3 mm;2 级为透明明显的红色球结膜血管有多个分支,从角膜缘延伸到结膜穹窿;3 级为红色至暗红色球结膜血管有广泛分支和/或弯曲,从角膜缘延伸至结膜穹窿。大血管之间的结膜可能呈粉红色至淡红色。

结膜水肿分级:0 级为结膜组织无异常肿胀,或局部结膜肿胀未超过正常范围,见于眼周区域,无眼睑外翻或眼睑边缘轮廓变化;1 级为可见结膜正常弥漫性肿胀,但眼睑无外翻或眼睑边缘轮廓无变化;2 级为观察到眼睑结膜肿胀,导致眼睑外翻或者错位。眼睑边缘可能出现肿胀或不规则的肿胀轮廓,但仍完全闭合;3 级为眼睑结膜严重肿胀,部分或完全模糊。眼睑闭合不全,暴露的眼球或眼睑结膜突出于眼睑边缘之间。

1.2.3.4 手术时间 手术开始的标志为剪开球结膜,手术结束的标志为操作结束缝合球结膜。记录手术开始及结束时间,计算手术时长。

统计学方法:使用统计学软件 SPSS 27.0 进行统计分析,计量资料数据进行正态性检验,符合正态分布的计量资料采用 $\bar{x} \pm s$ 表示,手术时间比较采用独立样本 t 检验;偏态分布的计量资料采用 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示,IOP 差异比较采用广义估计方程(generalized estimated equation, GEE)的线性模型。结膜充血和结膜水肿差异比较采用 GEE 的有序 Logistic 模型。计数资料采用 $n(\%)$ 表示,采用 Fisher 确切概率法进行组间比较, $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 手术时间 FCB 组的平均手术时长(16.87 ± 2.29 min)

小于 SB 组的平均手术时长(46.25 ± 4.74 min),差异有统计学意义($t = -15.76, P < 0.001$)。

2.2 眼压 三组实验动物的眼压采用 GEE 线性模型分析,三组的时间因素和分组因素之间有交互效应($P < 0.001$),时间因素具有统计学意义($P < 0.001$),分组因素具有统计学意义($P < 0.001$)。SB 组及 FCB 组在术后各个随访节点眼压均高于 RRD 动物模型组(均 $P < 0.001$),且 SB 组与 FCB 组两组间眼压在术后各随访节点差异无统计学意义(均 $P > 0.05$),见表 1、2。三组实验兔的 IOP 随时间的变化趋势如图 5 所示。

2.3 眼前节检查结果分析

2.3.1 结膜充血 手术前,FCB 组与 SB 组的结膜充血分级差异无统计学意义($P = 0.342$);与术前相比,FCB 组和 SB 组术后第 3、7、14 d 结膜充血分级均上升,差异均具有统计学意义($P < 0.05$);与 SB 组相比,FCB 组术后第 3、7、14 d,结膜充血分级较术前上升更少,炎症反应更轻,差异均具有统计学意义($P < 0.05$);术后第 30、60、90 d 时结膜充血分级均为 0,两者无差异,见表 3、4。

2.3.2 结膜水肿 手术前,FCB 组与 SB 组的结膜水肿分级差异无统计学意义($P = 0.534$);与术前相比,FCB 组和 SB 组术后第 3、7 d 结膜水肿分级均上升,差异均具有统计学意义($P < 0.05$);与术前相比,FCB 组和 SB 组术后第 14 d

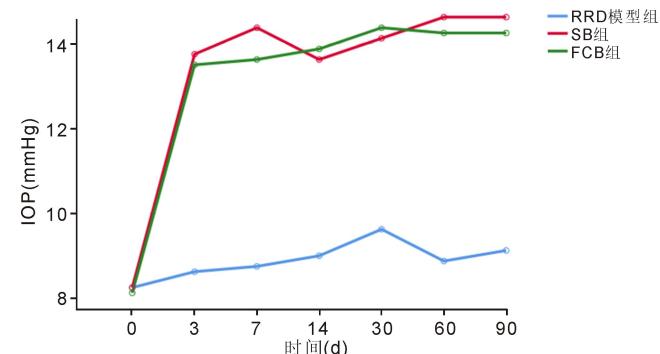


图 5 三组实验动物术眼 IOP 变化趋势图 时间轴的 0 为 FCB 巩膜外加压术和 SB 手术当天,3、7、14、30、60 和 90 分别为 FCB 组和 SB 组视网膜复位术后的 3、7、14、30、60、90 d。

表 1 三组实验动物手术前后各时间点眼压比较 [$M(P_{25}, P_{75})$, mmHg]

| 分组 | 术前 | 术后 3 d | 术后 7 d | 术后 14 d | 术后 30 d | 术后 60 d | 术后 90 d |
|---------|----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| RRD 模型组 | 8.00 (8.00, 9.00) | 9.00 (8.00, 9.00) | 9.00 (8.25, 9.00) | 9.00 (8.00, 10.00) | 10.00 (8.50, 10.00) | 9.00 (8.25, 9.00) | 9.00 (8.25, 9.75) |
| SB 组 | 8.00 (8.00, 9.00) | 14.00 (13.00, 14.00) | 14.50 (14.00, 15.00) | 14.00 (13.00, 14.00) | 14.00 (14.00, 14.75) | 15.00 (13.50, 15.00) | 15.00 (14.00, 15.00) |
| FCB 组 | 8.00 (8.00, 8.75) | 13.50 (13.00, 14.00) | 13.00 (13.00, 14.75) | 14.00 (13.00, 14.75) | 14.50 (14.00, 15.00) | 14.00 (14.00, 15.00) | 14.00 (14.00, 15.00) |

表 2 眼压的估计边际均值的成对比较

| 参数 | 均值差 | 标准误 | P | 95% 置信区间 | |
|--------------|-------|-------|--------|----------|-------|
| | | | | 下限 | 上限 |
| T1(G2 vs G1) | 0.00 | 0.331 | 1.000 | -0.790 | 0.790 |
| T1(G3 vs G1) | -0.12 | 0.316 | 1.000 | -0.880 | 0.630 |
| T1(G3 vs G2) | -0.12 | 0.316 | 1.000 | -0.880 | 0.630 |
| T2(G2 vs G1) | 5.13 | 0.290 | <0.001 | 4.430 | 5.820 |
| T2(G3 vs G1) | 4.88 | 0.351 | <0.001 | 4.040 | 5.710 |
| T2(G3 vs G2) | -0.25 | 0.385 | 1.000 | -1.170 | 0.670 |
| T3(G2 vs G1) | 5.63 | 0.290 | <0.001 | 4.930 | 6.320 |
| T3(G3 vs G1) | 4.88 | 0.339 | <0.001 | 4.060 | 5.690 |
| T3(G3 vs G2) | -0.75 | 0.390 | 0.164 | -1.680 | 0.180 |
| T4(G2 vs G1) | 4.63 | 0.351 | <0.001 | 3.790 | 5.460 |
| T4(G3 vs G1) | 4.88 | 0.412 | <0.001 | 3.890 | 5.860 |
| T4(G3 vs G2) | 0.25 | 0.325 | 1.000 | -0.530 | 1.030 |
| T5(G2 vs G1) | 4.50 | 0.410 | <0.001 | 3.520 | 5.480 |
| T5(G3 vs G1) | 4.75 | 0.428 | <0.001 | 3.720 | 5.780 |
| T5(G3 vs G2) | 0.25 | 0.325 | 1.000 | -0.530 | 1.030 |
| T6(G2 vs G1) | 5.75 | 0.410 | <0.001 | 4.770 | 6.730 |
| T6(G3 vs G1) | 5.38 | 0.316 | <0.001 | 4.620 | 6.130 |
| T6(G3 vs G2) | -0.37 | 0.422 | 1.000 | -1.380 | 0.630 |
| T7(G2 vs G1) | 5.50 | 0.370 | <0.001 | 4.610 | 6.390 |
| T7(G3 vs G1) | 5.13 | 0.403 | <0.001 | 4.160 | 6.090 |
| T7(G3 vs G2) | -0.37 | 0.290 | 0.587 | -1.070 | 0.320 |

注:T1、T2、T3、T4、T5、T6、T7 分别表示术前,术后 3、7、14、30、60、90 d;G1、G2、G3 分别表示 RRD 动物模型组、SB 组、FCB 组。

表 3 两组实验动物手术前后结膜充血分级频数表 ($n=8$, 眼)

| 分组 | 术前 | | | | 术后 3 d | | | | 术后 7 d | | | | 术后 14 d | | | |
|-------|-----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|---------|-----|-----|-----|
| | 0 级 | 1 级 | 2 级 | 3 级 | 0 级 | 1 级 | 2 级 | 3 级 | 0 级 | 1 级 | 2 级 | 3 级 | 0 级 | 1 级 | 2 级 | 3 级 |
| SB 组 | 3 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 4 | 0 | 0 | 7 | 1 | 0 | 3 | 4 | 1 |
| FCB 组 | 5 | 3 | 0 | 0 | 1 | 3 | 4 | 0 | 4 | 4 | 0 | 0 | 6 | 2 | 0 | 0 |

表 4 两组实验动物手术前后结膜充血变化的比较

| 参数 | 估计值 | 标准误 | χ^2 | P |
|---------------------|--------|-------|----------|--------|
| Intercept 结膜充血(0 级) | -0.415 | 0.677 | 0.376 | 0.540 |
| Intercept 结膜充血(1 级) | 3.278 | 0.999 | 10.767 | 0.001 |
| Intercept 结膜充血(2 级) | 7.483 | 1.619 | 21.366 | <0.001 |
| 组别 | -0.949 | 1.000 | 0.901 | 0.342 |
| 时间 3 vs 0 | 4.103 | 1.253 | 10.717 | 0.001 |
| 时间 2 vs 0 | 5.970 | 1.411 | 17.903 | <0.001 |
| 时间 1 vs 0 | 7.512 | 1.315 | 32.651 | <0.001 |
| 组别-时间交互项(3 vs 0) | -4.679 | 1.516 | 9.530 | 0.002 |
| 组别-时间交互项(2 vs 0) | -5.483 | 1.447 | 14.363 | <0.001 |
| 组别-时间交互项(1 vs 0) | -3.528 | 1.582 | 4.973 | 0.026 |

注:时间 1 vs 0、时间 2 vs 0、时间 3 vs 0 分别表示术后 3、7、14 d 与术前比较;术后 30、60、90 d SB 组及 FCB 组结膜充血分级均为 0,两者无差异,因此不纳入 GEE 模型进行分析。

的结膜水肿分级差异无统计学意义($P>0.05$)；与 SB 组相比,FCB 组术后第 3、7、14 d,结膜水肿分级较术前上升更少,炎症反应更轻,但差异均无统计学意义(均 $P>0.05$)；术后第 30、60、90 d 时 SB 及 FCB 组结膜水肿分级均为 0,两者无差异,见表 5、6。

2.3.3 前房渗出和角膜血管化 SB 组与 FCB 组所有兔眼随访期间均未发现角膜血管化及前房渗出和炎症。

2.4 视网膜复位率 至实验观察期结束第 90 d,FCB 组 7 只兔眼视网膜复位,复位率为 87.5%,SB 组 6 只兔眼视网膜复位,复位率为 75.0%,两组视网膜复位率对比差异无统计学意义($P>0.05$),RRD 模型组未发现兔眼视网膜复位。与 RRD 动物模型组相比,FCB 组和 SB 组兔眼视网膜复位率差异均有统计学意义($P<0.001$),各组术前、术后眼底照相及 B 超影像见图 6。

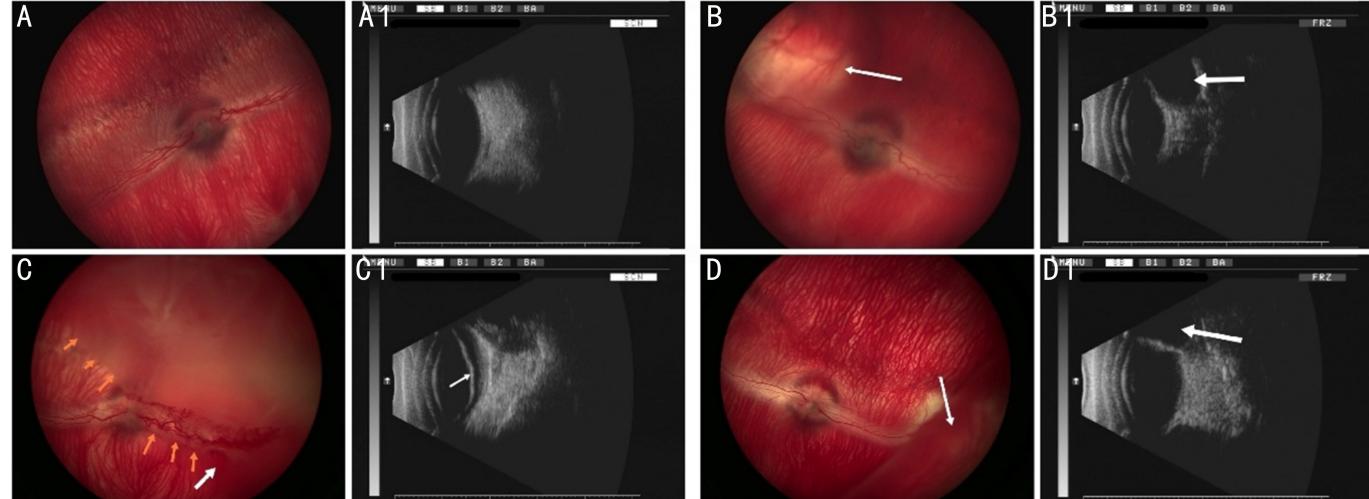


图 6 兔眼眼底照相及 B 超 A: 实验操作前正常兔眼眼底照片;A1: 实验操作前正常兔眼 B 超;B: FCB 巩膜外加压术后眼底照相示网膜平伏,球囊垫压嵴清晰可见(白色箭头);B1: B 超可见眶内垫压嵴回声(白色箭头);C: 兔眼 RRD 模型造模成功后的眼底图片,视网膜脱离边界(橘黄色箭头)、裂孔(白色箭头);C1: B 超可见视网膜脱离(白色箭头);D: SB 术后眼底照相示视网膜平伏,硅胶带垫压嵴清晰可见(白色箭头);D1: B 超可见垫压嵴回声(白色箭头)。

表 5 两组实验动物手术前后结膜水肿分级频数表 ($n=8$, 眼)

| 分组 | 术前 | | | | 术后 3 d | | | | 术后 7 d | | | | 术后 14 d | | | |
|-------|-----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|---------|-----|-----|-----|
| | 0 级 | 1 级 | 2 级 | 3 级 | 0 级 | 1 级 | 2 级 | 3 级 | 0 级 | 1 级 | 2 级 | 3 级 | 0 级 | 1 级 | 2 级 | 3 级 |
| SB 组 | 6 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 3 | 3 | 0 | 4 | 3 | 1 | 4 | 3 | 0 | 1 |
| FCB 组 | 7 | 1 | 0 | 0 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 4 | 1 | 0 | 4 | 4 | 0 | 0 |

表 6 两组实验动物手术前后结膜水肿变化的比较

| 参数 | 估计值 | 标准误 | χ^2 | P |
|---------------------|--------|-------|----------|-------|
| Intercept 结膜水肿(0 级) | 1.130 | 0.807 | 1.961 | 0.161 |
| Intercept 结膜水肿(1 级) | 3.747 | 0.961 | 15.216 | 0.000 |
| Intercept 结膜水肿(2 级) | 5.241 | 1.186 | 19.542 | 0.000 |
| 组别 | -0.828 | 1.333 | 0.386 | 0.534 |
| 时间 3 vs 0 | 1.272 | 1.356 | 0.880 | 0.348 |
| 时间 2 vs 0 | 3.762 | 0.994 | 14.339 | 0.000 |
| 时间 1 vs 0 | 4.798 | 1.117 | 18.465 | 0.000 |
| 组别-时间交互项(3 vs 0) | 0.564 | 1.699 | 0.110 | 0.740 |
| 组别-时间交互项(2 vs 0) | -1.267 | 1.617 | 0.614 | 0.433 |
| 组别-时间交互项(1 vs 0) | -1.088 | 1.777 | 0.375 | 0.540 |

注:时间 1 vs 0、时间 2 vs 0、时间 3 vs 0 分别表示术后 3、7、14 d 与术前比较;术后 30、60、90 d SB 组及 FCB 组结膜水肿分级均为 0,两者无差异,因此不纳入 GEE 模型进行分析。

3 讨论

RRD 的病理机制主要涉及局部玻璃体液化后脱离引发的裂孔形成及增殖性病变的机械牵拉,液化的玻璃体进入并积聚在视网膜的神经上皮和色素上皮之间,进而导致视网膜脱离。手术封闭裂孔,促进视网膜附着和下液吸收是治疗 RRD 的关键^[12,16-17]。SB 作为治疗 RRD 的经典手术方式已有 70 a 左右历史^[18-19],其核心原理是通过外源性材料(如硅胶或海绵)对巩膜进行加压,产生一种对巩膜向内的作用力,术中结合二氧化碳冷冻、视网膜激光光凝、放出视网膜下液,使视网膜神经上皮层与色素上皮层重新贴附,达到治疗 RRD 的目的^[19-20],FCB 作为改良术式,手术过程模拟了传统外垫压的原理,将球囊植入到视网膜脱离处的眼球外壁处,通过注入生理盐水充盈球囊,对巩膜产生向内的压力,形成垫压嵴,进而达到治疗 RRD 的目的^[10]。

本团队在前期临床研究中发现,SB 组与 FCB 组治疗 RRD 的视网膜复位率分别为 96% 和 92%, 差异无统计学意义 ($P>0.05$), 两组患者术后 3 mo 最佳矫正视力 (best corrected visual acuity, BCVA) 较术前均提升, 且两组间 BCVA 水平差异无统计学意义 ($\chi^2=0.9214, P>0.05$)^[21], 这表明 FCB 巩膜外加压术与 SB 能达到相同的治疗效果。同时, 我们观察到 FCB 组患者术后视觉模拟评分 (visual analogue scale, VAS) 较 SB 组患者低^[10,16,21], 且 FCB 组术后早期炎症反应较 SB 组轻。本研究通过构建 RRD 动物模型, 比较了 FCB 巩膜外加压术和 SB 治疗实验性 RRD 的疗效。结果表明, 两种手术方式疗效相似, FCB 组在视网膜复位率与术后眼压控制方面与 SB 组无显著差异 (87.5% vs 75.0%), 但其手术时间缩短 (16.87 ± 2.29 vs 46.25 ± 4.74 min), 且术后炎症反应低于 SB 组 ($P<0.05$), 并在 3 mo 的随访期内, 未发现网膜复脱及球囊移位。由此可见, FCB 巩膜外加压术在保证疗效的同时具有显著的微创优势。

在之前的一些研究中, RRD 动物模型通过 PPV 切除兔眼的玻璃体, 随后用玻璃体切割器在指定位置进行撕裂造孔^[22-23], 用来评价特定的材料对视网膜裂孔的封闭作用, 这种方法操作繁琐, 对设备要求较高, 进而增加了实验难度。其次, 此方法切除了兔眼的玻璃体, 破坏了兔眼的自身代谢, 有可能会影响术后随访指标的准确性。故未采纳该方法进行造模。本研究利用透明质酸酶的生物活性和 26G 针头的狭小空间, 通过反复推注注射器的方法, 在短时间内液化局部玻璃体, 最终用快速液流冲击造孔, 在最大程度保留兔眼原有玻璃体的前提下诱导兔眼产生 RRD^[14], 最大程度模拟了人眼 RRD 的病理过程。

本研究中, FCB 组和 SB 组复位成功的兔眼术后眼底照相和 B 超显示垫压嵴位形成良好, 裂孔精准封闭, 并且两组视网膜复位率无统计学差异。这表明通过使球囊充盈顶压巩膜, 可以形成有效的垫压嵴, 进而达到与 SB 相当的解剖复位效果。眼压方面, FCB 组和 SB 组的术后眼压无明显统计学差异, 这表明, FCB 巩膜外加压术可以达到与 SB 相似的术后眼压控制效果, 在形成有效垫压嵴的同时不妨碍正常的房水循环。研究中观察到, FCB 组术后结膜充血评分显著低于 SB 组 (1.25 ± 0.46 vs 2.50 ± 0.53 分), 这与术中减少结膜切开范围 (4 mm vs 180°环形切口) 及避免眼外肌牵拉直接相关。研究表明, 广泛分离眼肌可激活 NF-κB 通路 (nuclear factor-κB signaling pathway), 引发白细胞介素-6 (interleukin-6, IL-6)、肿瘤坏死因子 α (tumor necrosis factor-alpha, TNF-α) 等促炎因子释放^[24-25]。FCB 巩膜外加压术的微创入路可能通过减少组织损伤抑制炎症级联反应, 从而减轻术后的炎症反应。本研究还观察到, FCB 组平均手术时间较 SB 缩短近 30 min, 主要得益于术中仅作结膜切口、不需牵拉肌肉, 降低了术中发生眼-心反射的风险, 简化了操作流程, 缩短了手术时间^[10-11,21]。其次, FCB 巩膜外加压术在术前通过间接检眼镜进行裂孔定位, 结合术前眼底照相视网膜脱离的范围, 选用合适规格的球囊, 可更好的规划手术中的切口位置和范围, 无需术中定位耗费手术时间。因此, FCB 可能降低围手术期并发症的发生率, 尤其适用于儿童、高龄患者等耐受力较低

的患者群体。

目前, 临幊上针对 FCB 巩膜外加压术和 SB 两种手术方式治疗 RRD 的差异性比较主要评估的是两种手术方式术后的 BCVA、眼压、眼底照相等, 尚缺乏裂孔周围复位视网膜的病理组织学和分子生物学分析的相关研究。但是, 术后采集患者视网膜组织进行研究分析可能会造成患者的视网膜损伤和严重的伦理问题, 所以需要用动物模型来进行模拟。本研究运用 FCB 巩膜外加压术和 SB 治疗实验性 RRD, 并在 3 mo 的观察期内未发现严重的炎症反应、球囊移位以及视网膜复脱的情况, 初步证明该动物模型安全性和稳定性。同时, 本研究结果表明 FCB 巩膜外加压术在治疗实验性 RRD 中能达到与 SB 相似的疗效, 同时 FCB 巩膜外加压术展现了其操作简单、手术时间短、术后早期炎症反应轻微的优势, 这与我们在临幊上所得出的结论一致。故本研究的方法和结论可以为后续的组织病理学、分子生物学以及更加深入的研究建立良好的前期研究基础。

本研究存在一定的局限性: (1) 样本量较小, 更大的样本量可能会分析出更多的统计学差异; (2) 动物模型无法完全模拟人 RRD 发病过程, 这可能会导致研究结果的偏差; (3) 术后观察期较短, 未能评估 FCB 巩膜外加压术的长期性能及球囊取出后的巩膜重塑。

综上所述, FCB 巩膜外加压术和 SB 均能有效治疗实验性 RRD。与 SB 相比, FCB 巩膜外加压术操作简单、手术时间短, 显著降低了手术的创伤及炎症风险。未来需扩大样本量并延长观察期, 同时在组织病理学和分子生物学的角度更加深入的评估和分析 FCB 巩膜外加压术和 SB 对实验性 RRD 治疗疗效和术后并发症之间的差异, 从而增加我们对不同外路手术的理解, 为临幊治疗 RRD 的手术方式选择提供更多理论依据。

利益冲突证明: 本文不存在利益冲突。

作者贡献声明: 董毅凡论题与修改, 初稿撰写; 张百珂、贾雍、杨帆、郭丽莎、张向阳、卢聪、张中浩、武海燕文献检索, 数据分析; 田学敏选题指导, 论文修改及审阅。所有作者阅读并同意最终的文本。

参考文献

- [1] Zheng CZ, Xi HW, Wen DJ, et al. Biocompatibility and efficacy of a linearly cross-linked sodium hyaluronic acid hydrogel as a retinal patch in rhegmatogenous retinal detachment repairment. *Front Bioeng Biotechnol*, 2022, 10:914675.
- [2] D'Albenzio A, Komici K, Affatato M, et al. Vitreous cortex remnants in patients with rhegmatogenous retinal detachment: a systematic review and meta-analysis. *Surv Ophthalmol*, 2025, 70(1):63-74.
- [3] Ge JY, Teo ZL, Chee, et al. International incidence and temporal trends for rhegmatogenous retinal detachment: a systematic review and meta-analysis. *Surv Ophthalmol*, 2024, 69(3):330-336.
- [4] Heriot WJ, Metha AB, He Z, et al. Optimizing retinal thermofusion in retinal detachment repair: achieving instant adhesion without air tamponade. *Ophthalmol Sci*, 2022, 2(4):100179.
- [5] Davidović S, Babović S, Miljković A, et al. Updates on treatment modalities for primary rhegmatogenous retinal detachment repair. *Diagnostics (Basel)*, 2024, 14(14):1493.
- [6] Wang AJ, Snead MP. Scleral buckling—a brief historical overview

- and current indications. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2020, 258(3):467–478.
- [7] Popovic MM, Muni RH, Nichani P, et al. Pars Plana vitrectomy, scleral buckle, and pneumatic retinopexy for the management of rhegmatogenous retinal detachment: a meta-analysis. *Surv Ophthalmol*, 2022, 67(1):184–196.
- [8] Muni RH, Bansal A, Lee WW, et al. Minimal gas vitrectomy with scleral buckle to minimize retinal displacement in rhegmatogenous retinal detachment with inferior breaks. *Retin Cases Brief Rep*, 2023, 17(3):247–250.
- [9] Häring G, Wiechens B. Long-term results after scleral buckling surgery in uncomplicated juvenile retinal detachment without proliferative vitreoretinopathy. *Retina*, 1998, 18(6):501–505.
- [10] Zhang BK, Li C, Jia Y, et al. A pilot clinical study of treating rhegmatogenous retinal detachment by silicone rubber balloon scleral buckling. *Retina*, 2020, 40(10):1918–1928.
- [11] Li C, Zhang BK, Tan X, et al. A pilot clinical study of complex rhegmatogenous retinal detachment treatment via foldable capsular buckle scleral buckling. *BMC Ophthalmol*, 2023, 23(1):196.
- [12] 邢瑶凡. 可折叠球囊加压与传统巩膜外垫压治疗孔源性视网膜脱离的临床研究. 新乡医学院, 2022.
- [13] Wang PJ, Gao QY, Jiang ZX, et al. Biocompatibility and retinal support of a foldable capsular vitreous body injected with saline or silicone oil implanted in rabbit eyes. *Clin Exp Ophthalmol*, 2012, 40(1):e67–75.
- [14] 牟国营, 崔长霞, 国纪林. 实验性视网膜脱离模型的建立. 山东大学基础医学院学报, 2002, 16(6):360–361.
- [15] Machemer R, van Horn D, Aaberg TM. Pigment epithelial proliferation in human retinal detachment with massive periretinal proliferation. *Am J Ophthalmol*, 1978, 85(2):181–191.
- [16] 邢瑶凡, 余需, 张百珂, 等. 可折叠球囊在视网膜脱离患者治疗中的应用. 眼科新进展, 2023, 43(2):122–126.
- [17] Fouad YA, Habib AM, Sanders RN, et al. Persistent subretinal fluid following successful rhegmatogenous retinal detachment surgery. *Semin Ophthalmol*, 2022, 37(6):724–729.
- [18] 杨琼, 魏文斌. 巩膜扣带手术治疗孔源性视网膜脱离失败原因分析及再次扣带手术的有效性和安全性观察. 中华眼底病杂志, 2021(4):258–261.
- [19] Wang KY, Adams OE, Yu MD, et al. The necessity and role of scleral buckling for rhegmatogenous retinal detachment. *Curr Opin Ophthalmol*, 2024, 35(5):376–381.
- [20] Znaor L, Medic A, Binder S, et al. Pars Plana vitrectomy versus scleral buckling for repairing simple rhegmatogenous retinal detachments. *Cochrane Database Syst Rev*, 2019, 3(3):CD009562.
- [21] 张宁, 张百珂, 贾雍, 等. 折叠顶压球囊与传统巩膜外加压治疗孔源性视网膜脱离的对比研究. 国际眼科杂志, 2023, 23(5):813–817.
- [22] Teruya K, Sueda J, Arai M, et al. Patching retinal breaks with Seprafilm in experimental rhegmatogenous retinal detachment of rabbit eyes. *Eye (Lond)*, 2009, 23(12):2256–2259.
- [23] Wei QQ, Jiang YY. Patching retinal breaks with chitosan for retinal detachment in rabbits. *Discov Med*, 2023, 35(176):293–299.
- [24] 陈琳, 刘苹苹, 杨秀霞, 等. 结膜成纤维细胞由来的警报素对角膜成纤维细胞的促炎作用. 中国实验诊断学, 2020, 24(6):1021–1026.
- [25] Chen L, Liu Y, Zheng XS, et al. Alarms from conjunctival fibroblasts up-regulate matrix metalloproteinases in corneal fibroblasts. *Int J Ophthalmol*, 2020, 13(7):1031–1038.