

# 基于小梁网-Schlemm 管途径的微创青光眼手术治疗开角型青光眼的研究进展

孟素坤, 刘建荣

引用: 孟素坤, 刘建荣. 基于小梁网-Schlemm 管途径的微创青光眼手术治疗开角型青光眼的研究进展. 国际眼科杂志, 2025, 25(4):583-588.

基金项目: 西安市人民医院(西安市第四医院)孵化基金项目(No.2022LBSH10)

作者单位: (710004) 中国陕西省西安市人民医院(西安市第四医院) 陕西省眼科医院 西北大学附属人民医院

作者简介: 孟素坤, 毕业于北京大学, 博士, 住院医师, 研究方向: 青光眼的基础和临床研究。

通讯作者: 刘建荣, 学士, 主任医师, 西安市人民医院(西安市第四医院) 青光眼中心主任, 研究方向: 青光眼、白内障. [ljr\\_xasy@163.com](mailto:ljr_xasy@163.com)

收稿日期: 2024-08-05 修回日期: 2025-02-21

## 摘要

青光眼是全球首位不可逆性致盲性眼病, 通过手术降低眼压是治疗开角型青光眼(OAG)的重要手段。近年来微创青光眼手术(MIGS)逐渐兴起, 为青光眼的治疗提供了更多选择。基于小梁网-Schlemm 管途径的 MIGS 作用于房水流出的主要途径, 对眼部正常解剖结构的损伤较小, 逐渐成为主流手术。根据作用机制主要分为小梁网切开类、小梁网旁路类和 Schlemm 管扩张类三种类型, 代表术式和装置有内路房角镜下微导管/缝线辅助的全周小梁切开术(GATT)、微导管/缝线辅助下 360° 外路小梁切开术(MAT)、小梁消融术、双刃刀(KDB)、谷户钩(TMh)、准分子激光小梁切开术(ELT)、iStent 系列、Hydrus 微支架植入术、内路 Schlemm 管成形术(ABiC)、穿透性 Schlemm 管成形术(PCP)、新型微创内路三联(3T)手术。文章回顾了目前基于小梁网-Schlemm 管途径的 MIGS 在 OAG 中应用的文献, 旨在对此类 MIGS 治疗 OAG 的作用原理、有效性和安全性进行综述, 并对各术式的优缺点进行总结, 以期 OAG 手术治疗的选择和临床研究提供参考。

关键词: 微创青光眼手术; 小梁网; 房水流出通路; 开角型青光眼

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2025.4.11

## Advances in minimally invasive glaucoma surgeries for open-angle glaucoma based on the trabecular meshwork-Schlemm's canal pathway

Meng Sukun, Liu Jianrong

Foundation item: Xi'an People's Hospital (Xi'an Fourth Hospital) Incubation Fund (No.2022LBSH10)

Xi'an People's Hospital (Xi'an Fourth Hospital); Shaanxi Eye Hospital; Affiliated People's Hospital of Northwest University, Xi'an 710004, Shaanxi Province, China

Correspondence to: Liu Jianrong. Xi'an People's Hospital (Xi'an Fourth Hospital); Shaanxi Eye Hospital; Affiliated People's Hospital of Northwest University, Xi'an 710004, Shaanxi Province, China. [ljr\\_xasy@163.com](mailto:ljr_xasy@163.com)

Received:2024-08-05 Accepted:2025-02-21

## Abstract

• Glaucoma is the leading cause of irreversible blindness worldwide. Reducing intraocular pressure through surgical interventions is a crucial approach for managing open-angle glaucoma (OAG). In recent years, minimally invasive glaucoma surgeries (MIGS) have gained prominence, providing a lot of options for the treatment of glaucoma. MIGS that target the trabecular meshwork-Schlemm's canal pathway act on the main pathway of aqueous humor outflow with less damage to the normal anatomical structures of the eye, and are gradually becoming the mainstream procedures. These surgeries can be categorized into three main types based on their mechanisms of action: trabeculotomy, trabecular meshwork bypass, and Schlemm's canal dilation. Representative procedures and devices include gonioscopy-assisted transluminal trabeculotomy (GATT), microcatheter-assisted trabeculotomy (MAT), Trabectome, Kahook dual blade (KDB), Tanito microhook (TMH), excimer laser trabeculotomy (ELT), iStent series, Hydrus, ABiC, PCP and 3T procedures. This article reviews the current literature on the application of MIGS targeting the trabecular meshwork-Schlemm's canal pathway in OAG. It aims to discuss the principles, efficacy and safety of such MIGS for the treatment of OAG, and to summarize the advantages and disadvantages of each procedure, with a view to informing the choice of surgical treatment and clinical research for OAG.

• KEYWORDS: minimally invasive glaucoma surgeries; trabecular meshwork; aqueous humor outflow pathway; open-angle glaucoma

Citation: Meng SK, Liu JR. Advances in minimally invasive glaucoma surgeries for open-angle glaucoma based on the trabecular meshwork-Schlemm's canal pathway. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2025, 25(4):583-588.

## 0 引言

青光眼是一组伴有特征性视野缺损与视盘和视网膜神经纤维层损害的视神经病变的疾病,是全球首位不可逆性致盲性疾病<sup>[1]</sup>。根据房角是否开放,青光眼分为开角型青光眼(open-angle glaucoma, OAG)和闭角型青光眼,原发性开角型青光眼(primary open-angle glaucoma, POAG)是世界范围内最常见的青光眼类型<sup>[2]</sup>。病理性眼压升高是青光眼病情进展的主要危险因素<sup>[3]</sup>,降低眼压是目前治疗青光眼的主要手段<sup>[4]</sup>。小梁网-Schlemm管途径是房水流出的主要途径,也是房水流出阻力最高的部位<sup>[5]</sup>。近年来微创青光眼手术(minimally invasive glaucoma surgeries, MIGS)逐渐兴起。MIGS具有微创、有效降低眼压、安全性高、生物相容性高等优点<sup>[6]</sup>。根据作用位点不同,MIGS的作用原理可分为增加小梁网-Schlemm管途径引流、增加葡萄膜巩膜途径引流和增加结膜下引流<sup>[7]</sup>。其中增加小梁网-Schlemm管途径引流的MIGS,对眼部正常解剖结构的损伤较小,是中国青光眼指南(2020年)推荐的治疗POAG的首选手术方式之一<sup>[1]</sup>,近年来在青光眼手术中所占比例不断增加<sup>[8-9]</sup>。根据作用机制主要分为小梁网切开类、小梁网旁路类和Schlemm管扩张类三种类型。本文旨在对各类基于小梁网-Schlemm管途径的MIGS治疗OAG的作用原理、有效性和安全性进行综述,并对各术式的优缺点进行总结,以期OAG手术治疗的选择和临床研究提供参考。

### 1 小梁网切开类 MIGS

在小梁网-Schlemm管途径中,房水流出阻力大部分存在于小梁网,小部分存在于Schlemm管及远端部位<sup>[4]</sup>。小梁网是调节眼压的关键部位。小梁网切开类的MIGS作用原理是通过切开部分或全部小梁网,降低房水流出阻力,代表术式包括内路房角镜下微导管/缝线辅助的全周小梁切开术(gonioscopy-assisted transluminal trabeculotomy, GATT)、微导管/缝线辅助下360°外路小梁切开术(microcatheter-assisted trabeculotomy, MAT)、小梁消融术、双刃刀(kahook dual blade, KDB)内路小梁网切开术、谷户钩(tanito microhook, TMH)内路小梁网切开术、准分子激光小梁切开术(excimer laser trabeculotomy, ELT)等<sup>[10]</sup>。

**1.1 GATT与MAT** GATT是一种经内路使用微导管或者缝线进行内路全周小梁切开的手术<sup>[11]</sup>。作用原理是通过牵拉在Schlemm管内穿行全周的微导管或缝线,切开360°的小梁网和Schlemm管内壁组织,从而解除小梁网产生的全部阻力<sup>[11]</sup>。MAT与GATT类似,区别在于MAT通过结膜和巩膜瓣引入微导管。

GATT适用于原发性先天性青光眼(primary congenital glaucoma, PCG)、青少年型开角型青光眼(junior open-angle glaucoma, JOAG)以及成人OAG。Grover等<sup>[11]</sup>对198例OAG患者进行随访,发现GATT术后24 mo POAG患者眼压降低了37.3%;继发性开角型青光眼患者眼压降低了49.8%。GATT的手术成功率较高,在PCG、JOAG、成人OAG人群中的术后1 a条件成功率分别为87.9%<sup>[12]</sup>、81.2%<sup>[13]</sup>和83.7%<sup>[14]</sup>。MAT被认为是治疗PCG的金标准,其治疗PCG的1 a条件成功率为82.2%<sup>[12]</sup>,治疗POAG的1、3、5 a条件成功率分别为91.8%、88.1%和

76.5%<sup>[15]</sup>。这两种手术最常见的并发症是前房积血<sup>[11]</sup>。其他并发症较罕见,包括一过性眼压升高、浅前房等<sup>[11]</sup>。

GATT与MAT优点在于可以实现全周小梁网切开,可以最大限度地降低房水流出的近端阻力。与缝线相比,微导管的指示灯引导可以帮助术者判断微导管是否沿Schlemm管行进。GATT不干扰结膜、非滤过泡依赖。但由于切开组织较多,GATT与MAT的前房出血比局部小梁切开的手术多,可能造成术后早期眼压不稳定<sup>[16]</sup>。微导管设备较昂贵。手术操作难度较大,学习曲线长。Schlemm管的手术史和涉及Schlemm管严重房角发育不良是手术失败的危险因素<sup>[12]</sup>。

**1.2 小梁消融术** 小梁消融术是使用Trabectome设备消融90°-120°范围的小梁网及Schlemm管内壁组织的手术,自带的注-吸功能可以及时将组织碎屑吸除,并降低对周围组织的热损伤<sup>[17]</sup>。在2004年开始应用于临床,逐渐成为欧美国家治疗OAG的一线治疗手术方案<sup>[18]</sup>,2012年开始在中国应用<sup>[19]</sup>。对于合并白内障的OAG患者,可以联合超声乳化白内障吸除和人工晶状体植入术(phacoemulsification cataract extraction combined with intraocular lens implantation, PEI)<sup>[10]</sup>。

小梁消融术适用于可清晰观察房角结构的早中期OAG患者。小梁消融术治疗OAG术后2 a的条件成功率为60%-85%<sup>[20]</sup>,研究显示OAG患者接受小梁消融术后6 mo-2 a眼压降低了20%-40%或降低至15-18 mmHg<sup>[19-21]</sup>。Esfandiari等<sup>[22]</sup>发现小梁消融术治疗OAG术后5 a,眼压从 $20.0 \pm 5.6$  mmHg降低至 $15.6 \pm 4.6$  mmHg,降眼压药物从 $1.8 \pm 1.2$ 种降低至 $1.0 \pm 1.2$ 种( $n=61$ )。Jea等<sup>[23]</sup>在OAG患者中进行的回顾性研究发现,术后24 mo小梁消融术组眼压降低了43.5%( $n=115$ ),小梁切除术组眼压降低了61.3%( $n=102$ ),表明小梁消融术的降压效果弱于小梁切除术,但并发症发生率更低(除外回血)。常见并发症包括术中Schlemm管返流造成的回血、周边虹膜前黏连等,这些并发症大多可自行恢复<sup>[24]</sup>。威胁视力的并发症发生率不足1%<sup>[21]</sup>。

小梁消融术的优点有角膜切口小、手术时间短、方便与PEI联合、保留结膜的完整性。注-吸装置可以及时冲洗术中前房出血,保持术野清晰<sup>[25]</sup>。小梁消融术的降压幅度有限,可将眼压降低至中等程度,因此其更适用于早中期OAG。

**1.3 KDB内路小梁网切开术** KDB内路小梁网切开术是一种使用KDB双刃手术刀进行小梁网切开的MIGS,其独特的双刃设计,可以在小梁网中产生平行切口,从而去除一个条状的小梁网和Schlemm管内壁组织,一般切除3-5个钟点范围<sup>[26]</sup>。术后需用镊子将切除的组织取出。

Berdahl等<sup>[27]</sup>随访了行KDB内路小梁网切开术的42例53眼OAG患者,发现6 mo后眼压从 $23.5 \pm 1.1$  mmHg降低至 $15.0 \pm 0.6$  mmHg,降眼压药物从 $2.5 \pm 0.2$ 种降低至 $1.5 \pm 0.2$ 种。KDB内路小梁网切开术也可联合PEI<sup>[28]</sup>。Dorairaj等<sup>[29]</sup>发现KDB联合PEI术后12 mo眼压从 $16.8 \pm 0.6$  mmHg降低至 $12.4 \pm 0.3$  mmHg,降眼压药物从 $1.6 \pm 0.2$ 种降低至 $0.8 \pm 0.1$ 种( $n=52$ )。KDB内路小梁网切开术的1 a条件成功率为64.2%<sup>[30]</sup>。可见无论是单独手术还是联合PEI,KDB内路小梁网切开术均能有效降低眼压。其



并发症与小梁消融术类似<sup>[30]</sup>。

KDB 内路小梁网切开术的优点包括价格低廉、操作简单快捷、方便与 PEI 联合。与小梁消融术相比, KDB 不需要单独的电源及冲洗设备。其他小梁切开术如 GATT, 将小梁网切开一条缝, 可能会留下残余的小梁网小叶, 远期可能有纤维化的风险, 而 KDB 的双刃设计使切除的小梁网组织具有一定的宽度, 因此 KDB 可能具有更好的长期疗效<sup>[31]</sup>。但 KDB 有损伤 Schlemm 管外壁的风险, 目前相关临床研究较少。

**1.4 TMH 内路小梁切开术** TMH 是专用于内路切开小梁网的手术钩。TMH 可切开 120°–240° 范围的小梁网<sup>[32]</sup>。TMH 有直钩、右钩和左钩三种类型, 直钩用于鼻侧小梁网, 右钩和左钩用于颞侧小梁网<sup>[32]</sup>。

Yokoyama 等<sup>[33]</sup> 随访了接受 TMH 内路小梁切开术的 42 例 47 眼 OAG 患者, 发现术后 12 mo 眼压从 27.3±10.2 mmHg 降低至 15.6±4.1 mmHg, 降眼压药物从 3.9±1.2 种降低至 2.2±1.7 种, 条件成功率为 61.7%。Okada 等<sup>[34]</sup> 比较了 TMH 与 KDB 的疗效, 通过随访行 TMH 内路小梁切开术的 47 眼和行 KDB 内路小梁网切开术的 52 眼, 发现 36 mo 时两组的条件成功率分别为 55.0% 和 48.2% ( $P=0.32$ ), 说明 TMH 与 KDB 的中期手术效果相当。TMH 内路小梁切开术的并发症包括前房出血、一过性眼压升高等<sup>[33]</sup>。

TMH 内路小梁切开术的优点包括: 切开小梁网的范围广(可达周长的三分之二)、手术操作简单、学习曲线短、不损伤结膜和巩膜、手术时间短。与传统小梁切开术中使用的普通刀相比, TMH 的尖端设计为抹刀样, 更容易切开 Schlemm 管内壁而不损伤其外壁<sup>[32]</sup>。

**1.5 ELT** ELT 是利用准分子激光切除部分小梁网, 形成多个微通道的 MIGS<sup>[35]</sup>。准分子激光具有精度高、热损伤低、对附近组织影响小且不通过水传输能量的特点<sup>[36]</sup>, 因此非常适合于眼部手术。ELT 使用 308 nm 氯化氙(XeCl) 准分子激光, 在小梁网和 Schlemm 管内壁产生 200 μm 的小孔, 治疗深度约为 20 μm, 通常手术范围超过 90°<sup>[35]</sup>。

Jozic 等<sup>[37]</sup> 对接受单独 PEI、ELT 联合 PEI 与小梁消融术联合 PEI 的 OAG 患者进行回顾性研究, 共纳入 245 眼, 结果显示术后 1 a 三组的眼压分别降低了 1.5±4.0、4.3±5.6、5.3±4.5 mmHg, 降眼压药物分别减少了 0.1±0.8、0.9±0.8 和 0.8±0.7 种, 说明 ELT 联合 PEI 的降压效果强于单独 PEI。文献显示 ELT 的条件成功率为 47%–90%<sup>[35]</sup>。ELT 的并发症主要有前房出血和一过性眼压升高<sup>[35]</sup>。

ELT 的优点包括准分子激光精准度高、热损伤小。与其他小梁切开类手术相比, ELT 的作用位点更小, 因此前房出血较少。但该手术目前未在国内广泛开展。

## 2 小梁网旁路类 MIGS

小梁网旁路类 MIGS 手术包括 iStent 植入术、iStent inject 植入术、iStent inject W 植入术和 iStent infinite 植入术。此类手术的原理是将微型植入物从房角穿过小梁网进入 Schlemm 管腔, 形成小梁网旁路, 使房水经微型植入物直接流入 Schlemm 管, 从而达到增加房水流出、降低眼压的目的。

**2.1 iStent 植入术** iStent 是首个内路青光眼植入物, 是一种 L 形肝素涂层钛植入物<sup>[38]</sup>, 长 1 mm, 高 0.33 mm, 内径

120 μm<sup>[38]</sup>, 自 2004 年起应用于临床<sup>[31]</sup>。iStent 通常与 PEI 联合手术, 根据病情需要, 一次手术可以植入多个 iStent。

Samuelson 等<sup>[39]</sup> 报道了一项比较 iStent 联合 PEI 与单独 PEI 治疗 OAG 的随机对照试验(randomized controlled trial, RCT) 研究, 研究纳入 240 眼, 术后 12 mo 联合手术组和单独 PEI 组的手术完全成功率分别为 72% 和 50%, 表明 iStent 联合 PEI 降压效果优于单独 PEI。Katz 等<sup>[40]</sup> 发现随着 iStent 植入物数量的增加, 眼压的降低幅度更大。常见的并发症是植入物错位以及虹膜、血液或玻璃体造成管腔阻塞, 植入物引起过敏的风险很小<sup>[31]</sup>。

**2.2 iStent inject 植入术** iStent inject 是第二代 iStent, 为一字型钛支架, 长 360 μm, 基底直径 230 μm<sup>[31]</sup>。iStent inject 植入物通过专用的推注器植入, 该推注器可以预装 2 个植入物。于 2018 年在美国上市。

Hengerer 等<sup>[41]</sup> 研究发现在 iStent inject 联合 PEI 术后 36 mo, OAG 患者的眼压从 22.6±6.2 mmHg 降低至 14.3±1.7 mmHg, 降眼压药物从 2.5±1.1 种降低至 0.8±0.9 种 ( $n=41$ )。Samuelson 等<sup>[42]</sup> 报道 iStent inject 联合 PEI 术的 2 a 条件成功率为 75.8% ( $n=387$ )。以上这些研究提示 iStent inject 植入术治疗 OAG 的有效性明确。手术并发症与 iStent 类似<sup>[43]</sup>。

**2.3 iStent inject W 植入术** iStent inject W 是第三代 iStent, 形状与 iStent inject 类似, 长 360 μm, 基底直径 360 μm。同样通过专用的推注器植入, 可以预装 2 个植入物。于 2020 年在美国上市, 于 2024-05 在中国获批上市, 目前国内已开展 iStent inject W 植入术。

Deneri 等<sup>[44]</sup> 比较了 iStent inject W 与 iStent inject 在联合 PEI 治疗 OAG 的疗效, 发现术后 6 mo, iStent inject W 组眼压降低了 2.2 mmHg ( $n=35$ ), iStent inject 组降低了 0.06 mmHg ( $n=32$ ), 但 iStent inject 组的降眼压药物减少幅度显著大于 iStent inject W 组 ( $P=0.037$ ), 降眼压药物分别减少了 1.28 种和 0.62 种。然而, Morita 等<sup>[45]</sup> 却发现 iStent 与 iStent inject W 联合 PEI 的降压效果无明显差异, 纳入 iStent 组 55 眼和 iStent inject W 组 105 眼, 两组的眼压和降眼压药物数量组间差异无统计学意义。iStent inject W 植入术的 1 a 条件成功率为 78.4%<sup>[45]</sup>。

**2.4 iStent infinite 植入术** iStent infinite 是第四代 iStent, 与第三代 iStent 的区别在于 iStent infinite 可预装 3 个支架<sup>[46]</sup>。iStent infinite 于 2022 年在美国上市, 是美国 FDA 第一次批准可以独立治疗未伴随白内障手术的青光眼疾病的微创植入器械。

Sarkisian 等<sup>[46]</sup> 报道了一项 iStent infinite 治疗 OAG 的临床试验, 对 72 例 OAG 患者进行 iStent infinite (3 个支架) 植入术, 术后 12 mo 眼压降低了 5.9±0.6 mmHg, 条件成功率为 76.1%。

四代 iStent 的共同优点在于植入物小、手术操作简单、手术时间短、方便与 PEI 联合, 可以同时植入多个植入物, 以达到更大的降眼压幅度。推注器降低了手术难度, 缩短学习曲线。iStent inject W 和 iStent infinite 的设计从 iStent inject 的基础上改进, 增宽基底直径, 有助于减少植入过深的风险, 并提升支架在眼内的可见度。该类手术的缺点在于植入物错位和管腔阻塞可能会导致手术失败, 有

潜在的安全风险。

### 3 Schlemm管扩张类 MIGS

随着研究的深入,Schlemm管和远端房水通道在房水流出阻力中的作用逐渐引起人们的重视。研究发现Schlemm管扩张的程度与眼压下降幅度相关<sup>[47]</sup>。Schlemm管扩张类MIGS的设计原理为扩张Schlemm管与集液管入口、改善Schlemm管塌陷和小梁网疝<sup>[48]</sup>。主要包括Hydrus微支架植入术和内路Schlemm管成形术(ab interno canaloplasty, ABiC),此外,在Schlemm管扩张的手术原理上,结合小梁网切开的创新MIGS还包括穿透性Schlemm管成形术(penetrating canaloplasty, PCP)和新型微创内路三联(trabeculotomy tunnelling trabeculoplasty, 3T)手术。

**3.1 Hydrus微支架植入术** Hydrus微支架是一种新月形的Schlemm管支架,由镍钛合金制成,长8 mm,高0.3 mm<sup>[49]</sup>,于2018年开始应用于临床<sup>[31]</sup>。Hydrus微支架的作用原理包括:通过3个侧孔引流房水,提供小梁网旁路通路;在Schlemm管中作为支架,将约90°的管腔扩张至其自然宽度的大约4-5倍,有效防止Schlemm管管腔塌陷,扩张小梁网,使房水更容易进入下游集液管通道<sup>[50]</sup>。

Hydrus微支架植入术主要应用于轻中度OAG的治疗。Samuelson等<sup>[51]</sup>报道的一项多中心RCT研究,共纳入369例369眼POAG患者,发现Hydrus联合PEI术后2 a,眼压降低了7.6 mmHg,降眼压药物减少了1.4种,降压效果强于单独PEI;Hydrus组的手术成功率高于单独PEI,分别是77%和57%。Pfeiffer等<sup>[52]</sup>在100例100眼OAG患者中进行的RCT研究结果与之类似,发现Hydrus联合PEI的2 a条件成功率高于单独PEI,分别为80%和46%。这些研究证实了Hydrus微支架在OAG患者中的降压效果明确。值得注意的并发症是Hydrus微支架入口处附近虹膜粘连,研究发现7.6%的患者在术后3 a出现局灶性粘连,但并未引起眼压升高<sup>[53]</sup>。其他并发症发生率较低,如一过性眼压升高、角膜水肿等<sup>[53-54]</sup>。

Hydrus微支架植入术的优点是生物相容性好、创伤小,但植入物错位或管腔阻塞可能会导致手术失败。

**3.2 ABiC** ABiC是一种经内路微导管注入黏弹剂扩张Schlemm管的MIGS<sup>[55]</sup>。Gallardo等<sup>[55]</sup>发现ABiC治疗OAG术后1 a眼压从 $20.4 \pm 4.7$  mmHg降低至 $13.3 \pm 1.9$  mmHg,降眼压药物从 $2.8 \pm 0.9$ 种减少到 $1.1 \pm 1.1$ 种( $n=73$ )。Gallardo<sup>[56]</sup>随访了53例60眼POAG患者,发现ABiC术后2 a仍有明确的降低眼压效果。ABiC术后早期条件成功率为82%-86%<sup>[57]</sup>。常见的并发症是房角切开术中出血和术后轻微前房积血,两者均在1 wk内消退<sup>[55]</sup>。其他并发症罕见。

ABiC的优点包括:(1)与MAT等外路MIGS相比,ABiC不损伤结膜和巩膜组织、手术时间短、术后恢复快。(2)与GATT相比,ABiC术中出血少。缺点包括:(1)由于保留了完整的小梁网,ABiC的降压幅度可能不及GATT,且远期有Schlemm管再次塌陷的可能。(2)对房角结构的清晰度要求高。(3)微导管设备较昂贵。(4)手术技巧要求高,学习曲线长。

**3.3 PCP** PCP是一种从外路打开Schlemm管并切除局部小梁网(或深层角巩膜缘组织)和周边虹膜的MIGS<sup>[58]</sup>。手术设计原理包括:小梁网开窗,使房水经开窗口直接流

入Schlemm管断端;缝线长期扩张Schlemm管。

PCP原则上不受房角形态制约,也不受角膜混浊的影响,适用于OAG和闭角型青光眼<sup>[58-59]</sup>。Ye等<sup>[60]</sup>对45例52眼POAG患者进行RCT研究,发现术后24 mo,PCP组条件成功率和完全成功率分别为92.3%和76.9%,外路Schlemm管成形术组分别为64.1%和52.1%,说明PCP的手术成功率高于外路Schlemm管成形术。陈丽娜等<sup>[61]</sup>报道了缝线引导下PCP联合PEI的疗效,发现术后6 mo PCP的条件成功率为89%,完全成功率为67%( $n=27$ ),提示缝线引导的PCP也可以获得较好的降压效果。PCP的并发症包括前房出血、浅前房、脉络膜脱离等。

PCP的优点包括:(1)与内路MIGS相比,PCP不受房角形态、角膜混浊的制约。(2)与Schlemm管成形术相比,PCP通过切开局部小梁网,降低了小梁网处的房水阻力。(3)与小梁切除术相比,PCP非滤过泡依赖,可避免滤过泡相关并发症。缺点在于损伤结膜和巩膜组织、手术时间长、手术技巧要求高。

**3.4 3T手术** 3T手术又称小梁泵增强术,手术设计原理有:(1)切开部分小梁网,使房水直接流入Schlemm管;(2)利用黏弹剂扩张Schlemm管及集液管入口,改善Schlemm管塌陷和小梁网疝;(3)张力性缝线留置于Schlemm管内,长期扩张Schlemm管,增大Schlemm管及集液管入口直径,且缝线的牵拉力有利于保留小梁网的生物机械泵功能<sup>[8,57]</sup>。

3T手术适用于角膜透明的OAG以及角膜透明的慢性闭角型青光眼。桑青等<sup>[57]</sup>报道的RCT研究比较了3T手术与GATT治疗OAG的疗效,术后3 mo 3T组眼压从 $21.5 \pm 6.8$  mmHg降低至 $16.1 \pm 2.0$  mmHg( $n=20$ ),GATT组眼压从 $22.2 \pm 6.1$  mmHg降低至 $16.0 \pm 3.1$  mmHg( $n=23$ ),术后3 mo 3T组和GATT组的条件成功率分别为87%和89%,两组比较差异无统计学意义,但3T手术的术后并发症更少,提示3T手术的有效性与GATT相近,但安全性更高。该术式较新,已发表的研究较少,且样本量较小、随访时间较短,尚需更多研究证据。3T手术的优点在于对小梁网的破坏较小、保留了小梁网的生物机械泵功能,但手术时间较长、操作较复杂、学习曲线较长。

## 4 总结

基于小梁网-Schlemm管途径的MIGS治疗OAG有效且安全,降压幅度中等,具有创伤小、恢复快、非滤过泡依赖、并发症少等优点,对于轻中度OAG患者可以作为首选治疗方式。对于目标眼压期望控制在15 mmHg以下的晚期青光眼患者,MIGS似乎不是最佳选择。在这些手术中,GATT、MAT、3T手术、ABiC、PCP的操作难度较高、学习曲线长,其他手术的操作难度较低、手术时间更短。此外,涉及植入物的MIGS有植入物移位、管腔堵塞等风险,小梁网切开类MIGS术后前房出血发生率较高,容易出现术后早期眼压波动。微导管的价格昂贵,在选择手术方式时也需考虑患者的经济负担。

不过,目前的研究多为回顾性研究,MIGS的手术效果仍需更多高质量、前瞻性、RCT研究证实,长期疗效尚需进一步观察。此外,MIGS的适应证有望进一步扩展,如难治性青光眼、联合PEI治疗慢性闭角型青光眼等,还需在不同类型的继发性开角型青光眼中的疗效对比研究,为更多



的青光眼患者提供治疗选择。未来随着对房水流出通路的深入研究及现代成像技术的进步,有望实现术前对房水流出通路的结构评估和流体功能检查,从而实现手术的精准化定位,提高手术成功率。

**利益冲突声明:** 本文不存在利益冲突。

**作者贡献声明:** 孟素坤论文选题与修改,初稿撰写,文献检索,数据分析;刘建荣选题指导,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] 中华医学会眼科学分会青光眼学组, 中国医师协会眼科医师分会青光眼学组. 中国青光眼指南(2020年). 中华眼科杂志, 2020,56(8):573-586.

[2] Stuart KV, Madjedi K, Luben RN, et al. Alcohol, intraocular pressure, and open-angle glaucoma: a systematic review and meta-analysis. *Ophthalmology*, 2022,129(6):637-652.

[3] Stein JD, Khawaja AP, Weizer JS. Glaucoma in adults—screening, diagnosis, and management: a review. *JAMA*, 2021,325(2):164-174.

[4] Acott TS, Vranka JA, Keller KE, et al. Normal and glaucomatous outflow regulation. *Prog Retin Eye Res*, 2021,82:100897.

[5] Huang AS, Francis BA, Weinreb RN. Structural and functional imaging of aqueous humour outflow: a review. *Clin Exp Ophthalmol*, 2018,46(2):158-168.

[6] Nichani P, Popovic MM, Schlenker MB, et al. Microinvasive glaucoma surgery: a review of 3476 eyes. *Surv Ophthalmol*, 2021,66(5):714-742.

[7] Saheb H, Ahmed II. Micro-invasive glaucoma surgery: current perspectives and future directions. *Curr Opin Ophthalmol*, 2012,23(2):96-104.

[8] 王宁利. 微创内路三联手术治疗开角型青光眼. 中华眼科杂志, 2023,59(3):222-223.

[9] Cao Y, Lin HS, Mao HY, et al. Trend of glaucoma internal filtration surgeries in a tertiary hospital in China. *Int J Ophthalmol*, 2023,16(2):251-259.

[10] 中华医学会眼科学分会青光眼学组. 中国微创青光眼手术适应证选择专家共识(2023). 中华实验眼科杂志, 2023,41(6):521-526.

[11] Grover DS, Smith O, Fellman RL, et al. Gonioscopy-assisted transluminal trabeculotomy: an ab interno circumferential trabeculotomy: 24 months follow-up. *J Glaucoma*, 2018,27(5):393-401.

[12] Shi Y, Wang HZ, Oatts J, et al. Ab interno vs ab externo microcatheter-assisted trabeculotomy for primary congenital glaucoma with clear Cornea. *Clin Exp Ophthalmol*, 2020,48(9):1201-1209.

[13] Wang YW, Wang HZ, Han Y, et al. Outcomes of gonioscopy-assisted transluminal trabeculotomy in juvenile-onset primary open-angle glaucoma. *Eye (Lond)*, 2021,35(10):2848-2854.

[14] Aktas Z, Ucgul AY, Bektas C, et al. Surgical outcomes of prolene gonioscopy-assisted transluminal trabeculotomy in patients with moderate to advanced open-angle glaucoma. *J Glaucoma*, 2019,28(10):884-888.

[15] 刘妍, 王怀洲, 康梦田. 微导管辅助的小梁切开术治疗原发性开角型青光眼的远期疗效. 眼科, 2021,30(6):435-439.

[16] Salimi A, Nithianandan H, Al Farsi H, et al. Gonioscopy-assisted transluminal trabeculotomy in younger to middle-aged adults: one-year outcomes. *Ophthalmol Glaucoma*, 2021,4(2):162-172.

[17] Kaplowitz K, Schuman JS, Loewen NA. Techniques and outcomes of minimally invasive trabecular ablation and bypass surgery. *Br J Ophthalmol*, 2014,98(5):579-585.

[18] 张科. 青光眼引流装置植入术在治疗难治性青光眼中的作用. 中华实验眼科杂志, 2017,35(4):362-367.

[19] 黄萍, 王怀洲, 吴慧娟, 等. 小梁消融术疗效和安全性的临床观察. 中华眼科杂志, 2015,51(2):115-119.

[20] Polat JK, Loewen NA. Combined phacoemulsification and trabectome for treatment of glaucoma. *Surv Ophthalmol*, 2017,62(5):698-705.

[21] Kaplowitz K, Bussell II, Honkanen R, et al. Review and meta-analysis of ab-interno trabeculectomy outcomes. *Br J Ophthalmol*, 2016,100(5):594-600.

[22] Esfandiari H, Shah P, Torkian P, et al. Five-year clinical outcomes of combined phacoemulsification and trabectome surgery at a single glaucoma center. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2019,257(2):357-362.

[23] Jea SY, Francis BA, Vakili G, et al. Ab interno trabeculectomy versus trabeculectomy for open-angle glaucoma. *Ophthalmology*, 2012,119(1):36-42.

[24] Ting JL, Damji KF, Stiles MC, et al. Ab interno trabeculectomy: outcomes in exfoliation versus primary open-angle glaucoma. *J Cataract Refract Surg*, 2012,38(2):315-323.

[25] Kasahara M, Shoji N. Effectiveness and limitations of minimally invasive glaucoma surgery targeting Schlemm's canal. *Jpn J Ophthalmol*, 2021,65(1):6-22.

[26] 鞠宏, 蔡鸿英. Kahook 双刃刀内路小梁切除术的应用进展. 国际眼科纵览, 2021,45(4):280-284.

[27] Berdahl JP, Gallardo MJ, ElMallah MK, et al. Six-month outcomes of goniotomy performed with the kahook dual blade as a stand-alone glaucoma procedure. *Adv Ther*, 2018,35(11):2093-2102.

[28] 汤婉玉, 党亚龙. 微创青光眼手术的研究新进展. 中华眼外伤职业眼病杂志, 2022,44(10):793-800.

[29] Dorairaj SK, Seibold LK, Radcliffe NM, et al. 12-month outcomes of goniotomy performed using the kahook dual blade combined with cataract surgery in eyes with medically treated glaucoma. *Adv Ther*, 2018,35(9):1460-1469.

[30] ElMallah MK, Seibold LK, Kahook MY, et al. 12-month retrospective comparison of kahook dual blade excisional goniotomy with istent trabecular bypass device implantation in glaucomatous eyes at the time of cataract surgery. *Adv Ther*, 2019,36(9):2515-2527.

[31] Mathew DJ, Buys YM. Minimally invasive glaucoma surgery: a critical appraisal of the literature. *Annu Rev Vis Sci*, 2020,6:47-89.

[32] Tanito M. Microhook ab interno trabeculotomy, a novel minimally invasive glaucoma surgery. *Clin Ophthalmol*, 2018,12:43-48.

[33] Yokoyama H, Takata M, Gomi F. One-year outcomes of microhook trabeculotomy versus suture trabeculotomy ab interno. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2022,260(1):215-224.

[34] Okada N, Hirooka K, Onoe H, et al. Comparison of mid-term outcomes between microhook ab interno trabeculotomy and goniotomy with the kahook dual blade. *J Clin Med*, 2023,12(2):558.

[35] Durr GM, Töteberg-Harms M, Lewis R, et al. Current review of excimer laser trabeculostomy. *Eye Vis (Lond)*, 2020,7:24.

[36] Puliafito CA, Steinert RF, Deutsch TF, et al. Excimer laser ablation of the Cornea and lens. Experimental studies. *Ophthalmology*, 1985,92(6):741-748.

[37] Jozic L, Magner J, Funk J, et al. Success of combined cataract extraction plus excimer laser trabeculotomy exceeds that of combined ab interno trabeculectomy with the trabectome or cataract extraction alone. *Int Ophthalmol*, 2020,40(3):529-537.

[38] Craven ER, Katz LJ, Wells JM, et al. Cataract surgery with trabecularmicro-bypass stent implantation in patients with mild-to-moderate open-angle glaucoma and cataract: two-year follow-up. *J Cataract Refract Surg*, 2012,38(8):1339-1345.

- [39] Samuelson TW, Katz LJ, Wells JM, et al. Randomized evaluation of the trabecular micro-bypass stent with phacoemulsification in patients with glaucoma and cataract. *Ophthalmology*, 2011,118(3):459-467.
- [40] Katz LJ, Erb C, Carceller Guillamet A, et al. Long-term titrated IOP control with one, two, or three trabecular micro-bypass stents in open-angle glaucoma subjects on topical hypotensive medication: 42-month outcomes. *Clin Ophthalmol*, 2018,12:255-262.
- [41] Hengerer FH, Auffarth GU, Riffel C, et al. Prospective, non-randomized, 36-month study of second-generation trabecular micro-bypass stents with phacoemulsification in eyes with various types of glaucoma. *Ophthalmol Ther*, 2018,7(2):405-415.
- [42] Samuelson TW, Sarkisian SR, Lubeck DM, et al. Prospective, randomized, controlled pivotal trial of an ab interno implanted trabecular micro-bypass in primary open-angle glaucoma and cataract two-year results. *Ophthalmology*, 2019,126(6):811-821.
- [43] Healey PR, Clement CI, Kerr NM, et al. Standalone iStent trabecular micro-bypass glaucoma surgery: a systematic review and meta-analysis. *J Glaucoma*, 2021,30(7):606-620.
- [44] Deneri S, Merté RL, Eter N, et al. Comparison of the iStent inject® versus the iStent inject® W-both in combination with cataract surgery-In open-angle glaucoma. *J Clin Med*, 2023,12(23):7259.
- [45] Morita S, Sakanishi Y, Riyu I, et al. Comparative evaluation of iStent versus iStent inject W combined with phacoemulsification in open angle glaucoma. *PLoS One*, 2024,19(2):e0297514.
- [46] Sarkisian SR Jr, Grover DS, Gallardo MJ, et al. Effectiveness and safety of iStent infinite trabecularmicro-bypass for uncontrolled glaucoma. *J Glaucoma*, 2023,32(1):9-18.
- [47] Zhao ZN, Zhu XJ, He WW, et al. Schlemm's canal expansion after uncomplicated phacoemulsification surgery: an optical coherence tomography study. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2016, 57 ( 15 ): 6507-6512.
- [48] Zhang J, Wang NL. Progression on canaloplasty for primary open angle glaucoma. *Int J Ophthalmol*, 2019,12(10):1629-1633.
- [49] Gillmann K, Mansouri K. Minimally invasive glaucoma surgery: where is the evidence? *Asia Pac J Ophthalmol (Phila)*, 2020,9(3):203-214.
- [50] Mansouri K, Shaarawy T. Update on schlemm's canal based procedures. *Middle East Afr J Ophthalmol*, 2015,22(1):38-44.
- [51] Samuelson TW, Chang DF, Marquis R, et al. A schlemm canal microstent for intraocular pressure reduction in primary open-angle glaucoma and cataract: the HORIZON study. *Ophthalmology*, 2019,126(1):29-37.
- [52] Pfeiffer N, Garcia-Feijoo J, Martinez-de-la-Casa JM, et al. A randomized trial of a schlemm's canal microstent with phacoemulsification for reducing intraocular pressure in open-angle glaucoma. *Ophthalmology*, 2015,122(7):1283-1293.
- [53] Ahmed IIK, Rhee DJ, Jones J, et al. Three-year findings of the HORIZON trial: a schlemm canal microstent for pressure reduction in primary open-angle glaucoma and cataract. *Ophthalmology*, 2021,128(6):857-865.
- [54] Ahmed IIK, Fea A, Au L, et al. A prospective randomized trial comparing hydrus and iStent microinvasive glaucoma surgery implants for standalone treatment of open-angle glaucoma: the COMPARE study. *Ophthalmology*, 2020,127(1):52-61.
- [55] Gallardo MJ, Supnet RA, Ahmed IIK. Viscodilation of Schlemm's canal for the reduction of IOP *via* an ab-interno approach. *Clin Ophthalmol*, 2018,12:2149-2155.
- [56] Gallardo MJ. 24-month efficacy of viscodilation of schlemm's canal and the distal outflow system with iTrack ab-interno canaloplasty for the treatment of primary open-angle glaucoma. *Clin Ophthalmol*, 2021,15:1591-1599.
- [57] 桑青,王瑾,杨迪亚,等. 新型微创内路三联手术治疗开角型青光眼有效性及安全性的初步研究. *中华眼科杂志*, 2023,59(9):702-708.
- [58] 国家眼部疾病临床医学研究中心青光眼协作组. 穿透性 Schlemm 管成形术手术操作规范(2020). *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2021,23(11):801-804.
- [59] 叶雯青,古娟,胡城,等. 穿透性 Schlemm 管成形术远期效果的初步观察. *眼科*, 2022,31(1):14-19.
- [60] Ye W, Li J, Zhang S, et al. Efficacy and safety of penetrating canaloplasty versus ab externo canaloplasty for primary open-angle glaucoma: a randomized controlled trial. *Acta Ophthalmol*, 2025,103(1):e58-e65.
- [61] 陈丽娜,靳琳,孙露丹. 缝线引导下穿透性 Schlemm 管成形术联合超声乳化术治疗原发性开角型青光眼. *国际眼科杂志*, 2024,24(5):800-804.