

关注内引流与外引流微创青光眼手术的合理选用

杨宏方 卢文涵 孙兴怀

复旦大学附属眼耳鼻喉科医院眼科 全国微创青光眼手术研究 & 培训中心, 上海 200031

通信作者: 孙兴怀, Email: xhsun@shmu.edu.cn

【摘要】 青光眼是不可逆性致盲眼病的首要原因, 原发性开角型青光眼是其中的主要类型, 其致病机制复杂, 但降眼压仍是目前公认的最有效治疗手段。主流的抗青光眼手术是通过增加房水引流达到降低眼压的效果。近二十年来, 微创/微小切口抗青光眼手术 (MIGS) 逐渐成为青光眼手术的热点, 国内也逐步开展相关术式, 但临床效果并非完全理想。建议眼科医师应在充分理解房水流出路径的解剖、病理生理学特点和各种 MIGS 手术方式设计原理的基础上, 了解各术式的优势和局限性, 合理选择内引流和外引流 MIGS, 规范化开展微创青光眼手术。期待未来能利用无创的多模式影像学手段协助术前评估术眼的结构和功能, 为患者个体化选择和规划治疗方式, 实现青光眼的精准治疗。

【关键词】 青光眼; 微创/微小切口抗青光眼手术; 房水流出路径; 内引流术; 外引流术

基金项目: 上海申康医院发展中心研究计划 (SHDC2020CR6029)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20231225-00218

Rational selection between internal and external drainage approaches for microinvasive/minimally invasive glaucoma surgery in intraocular pressure control

Yang Hongfang, Lu Wenhan, Sun Xinghuai

Department of Ophthalmology, Eye & ENT Hospital of Fudan University, National Research & Training Center of Microinvasive/Minimally Invasive Glaucoma Surgery, Shanghai 200031, China

Corresponding author: Sun Xinghuai, Email: xhsun@shmu.edu.cn

[Abstract] Glaucoma stands as the leading cause of irreversible blindness, with primary open-angle glaucoma being the predominant type. Although its pathogenic mechanisms are intricate, lowering intraocular pressure remains the most effective treatment. Mainstream glaucoma surgeries aim to lower intraocular pressure by increasing aqueous humor outflow. Over the past two decades, microinvasive/minimally invasive glaucoma surgery (MIGS) has emerged as a hotspot in this field, focusing on minimizing incisions. Domestic practices have followed closely, but clinical outcomes have not been ideal. Based on a comprehensive understanding of the anatomy and pathophysiology of the aqueous outflow pathway and the design principles of various MIGS procedures, ophthalmologists should recognize the advantages and limitations of each technique. It is important to rationally choose between internal and external drainage MIGS and standardize their implementation. In the future, the use of non-invasive multimodal imaging techniques for preoperative assessment of the structural and functional aspects of the eye is expected to facilitate personalized selection and planning for precise treatment.

[Key words] Glaucoma; Microinvasive/minimally invasive glaucoma surgery; Aqueous humor outflow; Internal drainage procedures; External drainage procedures

Fund program: The Development Center Research Program of Shanghai Shengkang Hospital (SHDC2020CR6029)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20231225-00218

青光眼是全球重要的公共卫生问题, 是导致不可逆盲的重要病因, 原发性开角型青光眼 (primary open-

angle glaucoma, POAG) 是其中的一大主要类型。目前研究认为, 与原发性闭角型青光眼可以早期预防、阻止

疾病发生和发展的特点不同, POAG 只能通过治疗来控制疾病进展。据估计, 全世界约 7 600 万人患有青光眼, 其中 5 750 万人受到 POAG 的影响^[1]。尽管 POAG 的致病机制复杂、学说众多, 目前公认最直接有效的治疗方法仍然是通过药物、激光或手术降低眼压, 其中 20%~50% 的青光眼患者在其一生中需要进行手术治疗^[2]。抗青光眼手术实质上即为降眼压手术, 原则上青光眼眼压升高的病理机制主要为房水外流受阻, 因而针对该病理环节的手术主要是增加房水引流。众多手术方式中, 我们所熟知的小梁切除术和传统青光眼引流装置植入术是增加房水引流术式的经典代表, 其中小梁切除术是各国青光眼指南所推荐的“金标准”术式, 应用最为广泛。近二十年来, 多种新的抗青光眼术式不断涌现, 创口越来越微小, 我们统称为微创/微小切口抗青光眼手术 (microinvasive/minimally invasive glaucoma surgery, MIGS)^[3]。MIGS 已成为目前抗青光眼手术的热点和一大趋势。国内也在逐步开展这类手术, 但临床效果并不如意。究其原因, 存在着部分术者对相关术式认识较片面, 甚至对其手术设计原理未深入理解, 就开始在临床上实施相关手术, 以求新求快的问题。目前已有众多不同类型的 MIGS 手术在国内开展, 还有不少新的术式在不断研发问世, 合理选择相应术式为青光眼患者进行手术治疗的关键在于, 清楚理解房水流出路径的解剖和病理生理基础, 以及各类手术方式的设计原理, 以利于规范化开展 MIGS, 并获得最佳手术效果; 同时, 也激发我们思考, 如何改进和研发适合我国国情、具有我国自主知识产权的新型青光眼术式。青光眼新术式的出现都是基于青光眼眼压升高的基础研究发现, 因此, 了解并理解相关的研究进展对临床上 MIGS 的正确合理应用很有必要。

1 小梁网房水流出路径

小梁网房水流出路径, 又称经典房水流出路径, 就其生理解剖特点而言, 既往曾强调邻管小梁组织是房水流出阻力的主要构成部位^[4], 但后来的研究逐渐证明, 该结论可能部分源于实验条件的误差——已摘除的眼球处于低眼压状态, 此时使用固定液进行固定会导致所观察到的邻管结构比实际生理状态下更加致密^[5-6]。

小梁网房水流出路径的主要阻力来源可被人为地分为近端阻力和远端阻力。前者主要是指来源于小梁网的阻力, 后者则指来源于 Schlemm 管和下游途径的阻力^[7]。研究发现通过 360° 内路小梁切开, 在眼压只

有 10 mmHg (1 mmHg = 0.133 kPa) 时可解除 27% 的总流出阻力, 但在眼压为 20 mmHg 时可解除 62% 的阻力^[5,8]。如果移除 Schlemm 管的外壁及其表面的巩膜组织, 则可消除 75% 的总流出阻力^[5], 故而推算出只有 25% 的阻力由小梁网所致^[8]。以上 2 种测算结果看似矛盾, 但其实共同说明了近端阻力和远端阻力并非简单彼此独立, 即不是单纯的小梁网或 Schlemm 管所致, 而是由于 Schlemm 管的内壁内皮细胞与小梁网相连、外壁完整且坚韧, 两壁相贴合时, 阻力则大大增加^[9]。由此看来, 小梁网流出路径的阻力来源, 不仅有小梁网的渗透性参与, 还有小梁网疝入集合管开口以及 Schlemm 管塌陷闭合等产生的一系列阻力, 而且 Schlemm 管塌陷闭合是房水流出阻力的主要组成部分^[5]。此外, 还有容易被忽略的下游由集液管和房水静脉产生的引流阻力^[10-11]。

需要指出的是, 小梁网房水流出路径的阻力并非一成不变。当眼压升高时, 小梁网由于被动形变和位移导致 Schlemm 管塌陷甚至闭合, 流出阻力增加, 房水流畅系数大大下降^[12]。所以在高眼压状态下, 主要的阻力由小梁网的渗透性和 Schlemm 管的闭合共同导致^[9], 而且这是随着眼压的上升流出阻力迅速显著升高的一个重要的即时因素。在低眼压状态下, 主要阻力部位位于 Schlemm 管外壁及之后的下游流出路径 (集液管、房水静脉等)^[10]。

值得一提的是, 小梁网的位移并非缺点, 它发挥着“小梁泵”的重要作用^[13-14]。在生理状态下, 邻管小梁网细胞的突起与 Schlemm 管内壁的内皮相连, 并对其施加拉力以限制其向外扩张移动, 同时对房水流出阻力的调控有着重要作用^[15]。正常情况下眼压波动幅度约为 3 mmHg^[16], 在此范围内, 当眼压上升时, 小梁网因压力作用向 Schlemm 管外壁靠近, 被动疝入集合管开口。但由于小梁网的自身弹性以及形变之下的回弹力增加, “小梁泵”的功效也随之增加, 房水“泵”入 Schlemm 管, 眼压下降, 同时小梁网恢复原来的位置。可见正常状况下, Schlemm 管的闭合仅为—过性/可逆, 伴随着眼压的小范围波动。当发生青光眼时, 由于小梁网的弹性下降, 眼压升高时小梁网的回弹能力减弱, 即“小梁泵”功能障碍, Schlemm 管闭合状态延长。又因为生理状态下 Schlemm 管处于节段性的动态工作状态, 房水流出呈现节段性、脉冲式、动态变化的特点^[13,17-18]; 而局部的长期闭合使得房水不能在 Schlemm 管内良好循环以到达集合管开口处, 所以有效滤过减少, 眼压进一步升高, 形成恶性循环^[19]。

如前所述, 除了小梁网和 Schlemm 管, 位于下游的

集液管和房水静脉等产生的引流阻力往往容易被忽略。实质上,对于内引流 MIGS,其下游的阻力是术后效果的关键所在。生理状态下,房水进入 Schlemm 管后经 Schlemm 管外壁上的集合管开口进入到巩膜深层的集合管丛,汇入房水静脉,再回到体循环系统中^[20]。虽然在高眼压状态下,Schlemm 管的下游阻力对于房水流出的限制作用不明显,但在低眼压状态下,它是房水流出的主要阻力来源^[10]。研究显示,无论是集合管开口还是房水静脉,均在鼻下象限分布最多,房水静脉在颞下象限也较为丰富,所以这些方位是进行小梁网旁路 MIGS 手术的较佳位置^[21-24]。同时也要注意,一些球结膜、表层巩膜和巩膜的手术都可能破坏房水静脉及下游的引流系统,从而影响房水的系统引流。

2 非小梁网房水流出路径

非小梁网房水流出路径,又称为非经典房水流出路径,始于房水经前房角的睫状体带(睫状肌前表面)渗透到达睫状体上腔和/或脉络膜上腔,之后房水可以通过 3 种可能途径引流^[25]:(1)通过巩膜结缔组织,称为葡萄膜巩膜流,此途径以静水压为主要驱动力;(2)进入脉络膜血管,然后汇入涡静脉,称为葡萄膜涡静脉流,此途径以渗透压为主要动力、与静水压共同协调驱动完成;(3)进入睫状体内的淋巴管,称为葡萄膜淋巴管流,此途径目前尚存争议。无论是以上引流途径中的哪一种,限速步骤主要均为睫状体肌纤维及结缔组织所形成的阻力。可见,使用毛果芸香碱可增加该路径的阻力;相反,阿托品或前列腺类似物可降低该路径的阻力。发生睫状体脱离时,房水经此途径引流量可增加 4 倍之多^[26]。非小梁网房水流出路径在年轻健康个体的房水流出中所占比例较大,随着年龄增长,这一比例有所下降;在青光眼患者中这一流出路径所占比例较小。

3 MIGS 的分类及房水引流原理

MIGS 术式众多,分类方法也有多种。根据手术是否形成滤过泡可分为滤过泡形成 MIGS 和非滤过泡形成 MIGS^[27];根据手术的降压机制可分为增加房水引流和减少房水生成两大类手术^[28],其中通过解除或降低房水的流出阻力从而实现增加房水引流的手术占绝大多数^[27];根据手术操作入路方式又可分为内路和外路手术^[29];根据房水引流路径可分为内引流 MIGS 和外引流 MIGS 两大类,进一步又可依据促进房水流出的关键解剖位点细分为 3 类,即经小梁网和 Schlemm 管引流的 MIGS、经脉络膜上腔引流的 MIGS

和结膜下房水引流的 MIGS^[30-31],前两者可归为房水内引流术式,后者为外引流术式。按照 MIGS 的干预方式可将其分为利用支架构建旁路和对组织进行调整的 MIGS,特别是在经典房水流出路径 MIGS 中,可分为植入支架构建旁路以及移除房角组织或干预 Schlemm 管等^[32]。此外,尚有一些新的 MIGS 作用位点,如在透明角膜直接制作通道将房水引流至眼表^[33],按照定义和特点也可归为 MIGS。基于本文重点强调房水流出路径的解剖和病理生理基础,下文将按照促进房水引流的作用靶点分类法对不同类型的 MIGS 进行介绍。

3.1 作用靶点在小梁网-Schlemm 管的 MIGS

作用靶点在小梁网-Schlemm 管的 MIGS 包括 iStent、iStent Inject、Hydrus、KDB、房角镜辅助下内路 360° 小梁切开术 (gonioscopy-assisted transluminal trabeculotomy, GATT) 等。这类 MIGS 的设计理论基础认为小梁网和/或 Schlemm 管的闭合是房水流出的主要阻力部位。此类手术通过制作小梁网旁路,或在小梁网上植入微引流装置到 Schlemm 管内(如 iStent、iStent Inject、Hydrus Microstent 等)、或切开/切除小梁网(如 KDB 房角切开、GATT 等)、或扩张 Schlemm 管并防止 Schlemm 管塌陷(如内路粘小管成形术等),逆转疝入集合管开口的小梁网,从而达到内引流房水降眼压的目的。其中,小梁网旁路手术由于只是制作了跨小梁网通道,并未解决 Schlemm 管塌陷或闭合的问题,所以对房水流出阻力的改善并非立竿见影。而小梁网切开/切除或 Schlemm 管扩张术,虽然有效解决了 Schlemm 管塌陷闭合的因素,但由于未改变下游的引流通路,所以此类 MIGS 的降眼压效果受限于 Schlemm 管下游的引流功能,故而存在“天花板效应”。这也是临床上观察到成功的 GATT 术后眼压常常控制在 10~14 mmHg 的原因^[34]。而各种影响到下游集液管及引流通路的因素,均可能影响此类手术的效果。这些因素包括年龄相关性改变、慢性结膜炎(包括长期使用局部降眼压药物)、结膜或巩膜手术,以及长期的青光眼病程导致 Schlemm 管塌陷和集液管内瘀滞等^[5,13,35]。由此可见,这类 MIGS 术前需要对下游引流系统的功能状况进行评估,目前临床上所能采用的方法包括观察房水静脉的脉冲性血流、Schlemm 管的回血现象是否迅捷以及小梁网的色素沉积是否增加等,能够在一定程度上间接帮助判断评估。

3.2 通过脉络膜上腔引流的 MIGS

该类 MIGS 以 iStent Supra 为代表,其实质是回归到房水的非传统引流路径,同样通过制作旁路的方法

避开了睫状体的房水流出阻力,将前房与睫状体脉络膜上腔直接沟通,再通过前文所述的 3 种途径进行引流。可见,此类 MIGS 的优势是直接回避了生理性的非传统引流途径的限速步骤(睫状肌纤维和结缔组织阻力);但也存在一些缺点,如目前所发现的被召回的 Cypass 导致的角膜内皮细胞的丢失,以及比较常见的术后低眼压等^[36]。

3.3 通过结膜下引流的 MIGS

目前,此类 MIGS 主要有 XEN Gel Stent 和 InnFocus/PressFloMicroShunt,与传统小梁切除术的手术原理相似,该术式人为地将房水直接从前房引流到结膜下,跨过了生理性房水引流系统的所有阻力。那么抵达结膜下的房水去路如何?是否与生理状态下一样?众多研究均证明,经手术被引流到结膜下的房水是通过形态不规则、有盲端、有瓣膜且一系列淋巴系统标志物(包括 Prox1 和 podoplanin 等)阳性而血管标志物 CD31 阴性的淋巴管系统被引流的^[11,37-40]。

各象限的淋巴管引流效率并不完全相同,通常情况下,鼻侧的淋巴管最为丰富^[23,39,41-42]。如果手术过程中对淋巴系统造成损害,或者手术植入物引起了周围组织的炎症反应,亦或手术本身扰动了房水的性质和流动特性等,都会对淋巴引流系统造成不良影响,最终导致此类手术的效果差强人意。那么术前该如何对每个个体的淋巴管分布进行评估,如何增强淋巴管引流从而提高基于滤过泡的青光眼外引流手术成功率,这是目前临床面临的难题,也是未来研究努力的方向。

4 如何选择 MIGS

基于不同 MIGS 的作用原理不同,其适应证也有所不同。《中国微创青光眼手术适应证选择专家共识(2023)》对于 MIGS 的选择已有相关建议^[28],本文不再赘述。需要指出的是,MIGS 设计的初衷并非取代传统的滤过性手术,而是填补从早期患者采用药物治疗到中晚期患者接受手术治疗当中的过渡期方案的空白^[3]。因此,不宜单纯地将 MIGS 的手术降眼压效果与传统滤过性手术直接比较。仅从众多 MIGS 的手术效果来说,通常滤过泡形成/引流至结膜下的 MIGS 降低眼压的幅度较非滤过泡形成/内引流的 MIGS 大^[31],文献报道前者的降眼压效果甚至可与传统的滤过性手术相媲美,最大降眼压幅度术后 5 年可达 46.7%^[43],对于中晚期或难治性青光眼可作为又一选择。而非滤过泡形成/内引流的 MIGS 虽然降低眼压的幅度有限,为 30%~37%^[31,36,44-48],但因为其保留并利用了自然的生理引流路径,从结构上来说也更符合

人体生理结构,损伤较小,安全性较高,是早中期 POAG 的手术首选;至于术后效果,除了受限于下游阻力以外,植入物的设计和手术操作技巧是 2 个关键的决定性因素。从手术角度出发,当角膜透明时,可先行考虑内路手术^[49];当角膜条件不佳、房角不便观察时,则优先考虑外路手术^[50]。此外,当角结膜条件均较差、预期手术效果不良时,也可采用减少房水生成的手术。结合前文分析,若选择单一手术方案,笔者认为内引流术首选 KDB,外引流术首选 Xen。因为 KDB 完整去除了小梁网和 Schlemm 管的内壁,而且无需植入物,避免了植入物带来的相关问题。而 Xen 则跨越了小梁网-Schlemm 管的整个阻力部位,与金标准术式“小梁切除术”最为相似。但临床应用时,也发现其降眼压效果并不像理论上认为的那么理想。究其原因,它们各自也存在一定的改善空间。针对 KDB 术,可能术中操作细节上存在一些问题,其可能会损坏 Schlemm 管的外壁以及集合管的开口,反而增加了流出阻力。这需要术者今后在操作上进一步关注操作细节,或在手术器械的设计上针对此进行适当改进,进而增加一些规范化可控的辅助设备,便于术者操作。而对于 Xen,流速控制是目前面临的主要问题,其次是操作技巧以及与小梁切除术相似的引流通道的维护,都需要不断探索和改进。从另一角度思考,如此之多的术式分别针对不同的作用靶点,有研究者主张可以进行 2 种甚至多种组合,以达到更低的目标眼压。这里提醒注意的是:手术操作本身对眼部就是一种创伤,操作越多,对眼内微环境扰动越大,往往术后效果越不佳。最佳选择是通过最少、最简单、最快速、最便捷的操作以达到最好、最持久的降眼压效果。

综上所述,我们离抗青光眼的“完美术式”相差甚远。现今众多看似优秀的术式,却远远未达到预期的完美目标。目前开展的众多研究多为术后通过各种有创或无创的手段去验证手术效果,这对于临床工作的指导意义还远远不够。期待未来能够通过多模影像学方法,尤其是无创的手段,静态与动态成像技术相结合,在术前对青光眼的眼部房水引流系统相关解剖结构和功能状况进行充分评估,知晓造成眼压升高的病理环节所在,从而帮助临床医生在术前对手术方式进行个体化的选择和规划,优化手术方案,从而达到手术预期并实现精准治疗。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] Allison K, Patel D, Alabi O. Epidemiology of glaucoma: the past,

- present, and predictions for the future[J/OL]. *Cureus*, 2020, 12(11) : e11686 [2023-11-06]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7769798/>. DOI: 10.7759/cureus.11686.
- [2] Tham YC, Li X, Wong TY, et al. Global prevalence of glaucoma and projections of glaucoma burden through 2040: a systematic review and meta-analysis[J]. *Ophthalmology*, 2014, 121(11) : 2081-2090. DOI: 10.1016/j.ophtha.2014.05.013.
- [3] Ahmed II. MIGS and the FDA: what's in a name? [J]. *Ophthalmology*, 2015, 122(9) : 1737-1739. DOI: 10.1016/j.ophtha.2015.06.022.
- [4] Mäepea O, Bill A. Pressures in the juxtacanalicular tissue and Schlemm's canal in monkeys [J]. *Exp Eye Res*, 1992, 54(6) : 879-883. DOI: 10.1016/0014-4835(92)90151-h.
- [5] Andrew NH, Akkach S, Casson RJ. A review of aqueous outflow resistance and its relevance to microinvasive glaucoma surgery[J]. *Surv Ophthalmol*, 2020, 65(1) : 18-31. DOI: 10.1016/j.survophthal.2019.08.002.
- [6] Schacknow PN, Samples JR. *The glaucoma book* [M]. New York: Springer, 2010: 65-78.
- [7] Vahabikashi A, Gelman A, Dong B, et al. Increased stiffness and flow resistance of the inner wall of Schlemm's canal in glaucomatous human eyes[J/OL]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2019, 116(52) : 26555-26563 [2023-11-06]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31806762/>. DOI: 10.1073/pnas.1911837116.
- [8] Carreon T, van der Merwe E, Fellman RL, et al. Aqueous outflow-a continuum from trabecular meshwork to episcleral veins[J]. *Prog Retin Eye Res*, 2017, 57 : 108-133. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2016.12.004.
- [9] 孙兴怀, 王艳, 孟樊荣. 原发性开角型青光眼非穿透小梁手术患者深层巩膜瓣及小梁膜的病理学观察[J]. *中华眼科杂志*, 2003, 39(8) : 462-465. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2003.08.107.
- Sun XH, Wang Y, Meng FR. Pathological study on the deep scleral flap and external trabecular membrane obtained from non-penetrating trabecular surgery[J]. *Chin J Ophthalmol*, 2003, 39(8) : 462-465. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2003.08.107.
- [10] Rosenquist R, Epstein D, Melamed S, et al. Outflow resistance of enucleated human eyes at two different perfusion pressures and different extents of trabeculotomy[J]. *Curr Eye Res*, 1989, 8(12) : 1233-1240. DOI: 10.3109/02713688909013902.
- [11] Gonzalez JM Jr, Ko MK, Hong YK, et al. Deep tissue analysis of distal aqueous drainage structures and contractile features[J/OL]. *Sci Rep*, 2017, 7(1) : 17071 [2023-11-06]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5719038/>. DOI: 10.1038/s41598-017-16897-y.
- [12] Xin C, Wang RK, Song S, et al. Aqueous outflow regulation: optical coherence tomography implicates pressure-dependent tissue motion[J]. *Exp Eye Res*, 2017, 158 : 171-186. DOI: 10.1016/j.exer.2016.06.007.
- [13] Johnstone M, Xin C, Tan J, et al. Aqueous outflow regulation-21st century concepts[J/OL]. *Prog Retin Eye Res*, 2021, 83 : 100917 [2023-11-08]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8126645/>. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2020.100917.
- [14] Johnstone M, Xin C, Martin E, et al. Trabecular meshwork movement controls distal valves and chambers: new glaucoma medical and surgical targets[J/OL]. *J Clin Med*, 2023, 12(20) : 6599 [2023-11-08]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10607137/>. DOI: 10.3390/jcm12206599.
- [15] Johnstone MA. The aqueous outflow system as a mechanical pump: evidence from examination of tissue and aqueous movement in human and non-human primates[J]. *J Glaucoma*, 2004, 13(5) : 421-438. DOI: 10.1097/01.ijg.0000131757.63542.24.
- [16] Kaufmann C, Bachmann LM, Robert YC, et al. Ocular pulse amplitude in healthy subjects as measured by dynamic contour tonometry[J]. *Arch Ophthalmol*, 2006, 124(8) : 1104-1108. DOI: 10.1001/archophth.124.8.1104.
- [17] Battista SA, Lu Z, Hofmann S, et al. Reduction of the available area for aqueous humor outflow and increase in meshwork herniations into collector channels following acute IOP elevation in bovine eyes[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2008, 49(12) : 5346-5352. DOI: 10.1167/iovs.08-1707.
- [18] Lewczuk K, Jabłońska J, Konopińska J, et al. Schlemm's canal: the outflow vessel[J/OL]. *Acta Ophthalmol*, 2022, 100(4) : e881-e890 [2023-11-10]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9293138/>. DOI: 10.1111/aos.15027.
- [19] Du R, Xin C, Xu J, et al. Pulsatile trabecular meshwork motion: an indicator of intraocular pressure control in primary open-angle glaucoma[J/OL]. *J Clin Med*, 2022, 11(10) : 2696 [2023-11-20]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9142929/>. DOI: 10.3390/jcm11102696.
- [20] Johnson M. What controls aqueous humour outflow resistance? [J]. *Exp Eye Res*, 2006, 82(4) : 545-557. DOI: 10.1016/j.exer.2005.10.011.
- [21] M Elhusseiny A, Jamerson EC, Menshawey R, et al. Collector channels: role and evaluation in Schlemm's canal surgery[J]. *Curr Eye Res*, 2020, 45(10) : 1181-1187. DOI: 10.1080/02713683.2020.1773866.
- [22] Li P, Butt A, Chien JL, et al. Characteristics and variations of *in vivo* Schlemm's canal and collector channel microstructures in enhanced-depth imaging optical coherence tomography[J]. *Br J Ophthalmol*, 2017, 101(6) : 808-813. DOI: 10.1136/bjophthalmol-2016-309295.
- [23] Lee JY, Akiyama G, Saraswathy S, et al. Aqueous humour outflow imaging: seeing is believing[J]. *Eye (Lond)*, 2021, 35(1) : 202-215. DOI: 10.1038/s41433-020-01215-0.
- [24] Waxman S, Loewen RT, Dang Y, et al. High-resolution, three-dimensional reconstruction of the outflow tract demonstrates segmental differences in cleared eyes[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2018, 59(6) : 2371-2380. DOI: 10.1167/iovs.17-23075.
- [25] Johnson M, McLaren JW, Overby DR. Unconventional aqueous humor outflow: a review[J]. *Exp Eye Res*, 2017, 158 : 94-111. DOI: 10.1016/j.exer.2016.01.017.
- [26] Suguro K, Toris CB, Pederson JE. Uveoscleral outflow following cycloclialysis in the monkey eye using a fluorescent tracer[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 1985, 26(6) : 810-813.
- [27] Fellman RL, Mattox C, Singh K, et al. American glaucoma society position paper: microinvasive glaucoma surgery[J]. *Ophthalmol Glaucoma*, 2020, 3(1) : 1-6. DOI: 10.1016/j.ogla.2019.12.003.
- [28] 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)[J]. *中华实验眼科杂志*, 2023, 41(6) : 521-526. DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20230311-00083.
- Glaucoma Group of Ophthalmology Branch of Chinese Medical Association. Chinese consensus on the selection of indications for minimally invasive glaucoma surgery (2023)[J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2023, 41(6) : 521-526. DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20230311-00083.
- [29] Balas M, Mathew DJ. Minimally invasive glaucoma surgery: a review of the literature[J/OL]. *Vision (Basel)*, 2023, 7(3) : 54 [2023-11-12]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10443347/>. DOI: 10.3390/vision7030054.
- [30] Jabłońska J, Lewczuk K, Konopińska J, et al. Microinvasive glaucoma surgery: a review and classification of implant-dependent procedures and techniques[J/OL]. *Acta Ophthalmol*, 2022, 100(2) : e327-e338 [2023-11-20]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9291507/>. DOI: 10.1111/aos.14906.
- [31] Pereira I, van de Wijdeven R, Wyss HM, et al. Conventional glaucoma implants and the new MIGS devices: a comprehensive review of current options and future directions[J]. *Eye (Lond)*, 2021, 35(12) : 3202-3221. DOI: 10.1038/s41433-021-01595-x.
- [32] Ang B, Lim SY, Betzler BK, et al. Recent advancements in glaucoma surgery-a review[J/OL]. *Bioengineering (Basel)*, 2023, 10(9) : 1096 [2023-11-20]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10525614/>. DOI: 10.3390/bioengineering10091096.
- [33] Shah M. Micro-invasive glaucoma surgery-an interventional glaucoma revolution[J/OL]. *Eye Vis (Lond)*, 2019, 6 : 29 [2023-11-22].



- https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6766174/. DOI: 10.1186/s40662-019-0154-1.
- [34] Faria BM, Costa VP, Melillo G, et al. Gonioscopy-assisted transluminal trabeculotomy for glaucoma: 1-year outcomes and success predictors [J]. *J Glaucoma*, 2022, 31 (6) : 443 - 448. DOI: 10.1097/IJG.0000000000002025.
- [35] Tabet R, Stewart WC, Feldman R, et al. A review of additivity to prostaglandin analogs: fixed and unfixed combinations [J]. *Surv Ophthalmol*, 2008, 53 Suppl1 : S85-92. DOI: 10.1016/j.survophthal.2008.08.011.
- [36] Reiss G, Clifford B, Vold S, et al. Safety and effectiveness of bypass supraciliary micro-stent in primary open-angle glaucoma: 5-year results from the COMPASS XT Study [J]. *Am J Ophthalmol*, 2019, 208 : 219-225. DOI: 10.1016/j.ajo.2019.07.015.
- [37] Yu DY, Morgan WH, Sun X, et al. The critical role of the conjunctiva in glaucoma filtration surgery [J]. *Prog Retin Eye Res*, 2009, 28 (5) : 303-328. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2009.06.004.
- [38] Huang AS, Li M, Yang D, et al. Aqueous angiography in living nonhuman primates shows segmental, pulsatile, and dynamic angiographic aqueous humor outflow [J]. *Ophthalmology*, 2017, 124 (6) : 793-803. DOI: 10.1016/j.ophtha.2017.01.030.
- [39] Narayanaswamy A, Thakur S, Nongpiur ME, et al. Aqueous outflow channels and its lymphatic association: a review [J]. *Surv Ophthalmol*, 2022, 67 (3) : 659-674. DOI: 10.1016/j.survophthal.2021.10.004.
- [40] Huang AS, Francis BA, Weinreb RN. Structural and functional imaging of aqueous humour outflow: a review [J]. *Clin Exp Ophthalmol*, 2018, 46 (2) : 158-168. DOI: 10.1111/ceo.13064.
- [41] Wu Y, Seong YJ, Li K, et al. Organogenesis and distribution of the ocular lymphatic vessels in the anterior eye [J/OL]. *JCI Insight*, 2020, 5 (13) : e135121 [2023-11-23]. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7406257/. DOI: 10.1172/jci.insight.135121.
- [42] Akiyama G, Saraswathy S, Bogarin T, et al. Functional, structural, and molecular identification of lymphatic outflow from subconjunctival blebs [J/OL]. *Exp Eye Res*, 2020, 196 : 108049 [2023-11-23]. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7328765/. DOI: 10.1016/j.exer.2020.108049.
- [43] Battle JF, Corona A, Albuquerque R. Long-term results of the PRESERFLO MicroShunt in patients with primary open-angle glaucoma from a single-center nonrandomized study [J]. *J Glaucoma*, 2021, 30 (3) : 281-286. DOI: 10.1097/IJG.0000000000001734.
- [44] Samuelson TW, Sarkisian SR Jr, 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 [J]. *Ophthalmology*, 2019, 126 (6) : 811-821. DOI: 10.1016/j.ophtha.2019.03.006.
- [45] Ahmed I, Fea A, Au L, et al. A prospective randomized trial comparing hydrus and iStent microinvasive glaucoma surgery implants for stand-alone treatment of open-angle glaucoma: the COMPARE Study [J]. *Ophthalmology*, 2020, 127 (1) : 52-61. DOI: 10.1016/j.ophtha.2019.04.034.
- [46] Skaat A, Sagiv O, Kinori M, et al. Gold micro-shunt implants versus ahmed glaucoma valve: long-term outcomes of a prospective randomized clinical trial [J]. *J Glaucoma*, 2016, 25 (2) : 155-161. DOI: 10.1097/IJG.000000000000175.
- [47] Fili S, Janoud L, Vastardis I, et al. The STARflo™ glaucoma implant: a single-centre experience at 24 months [J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2019, 257 (12) : 2699-2706. DOI: 10.1007/s00417-019-04461-5.
- [48] Denis P, Hirneiß C, Reddy KP, et al. A first-in-human study of the efficacy and safety of MINject in patients with medically uncontrolled open-angle glaucoma (STAR- I) [J]. *Ophthalmol Glaucoma*, 2019, 2 (5) : 290-297. DOI: 10.1016/j.ogla.2019.06.001.
- [49] Yang SA, Ciociola EC, Mitchell W, et al. Effectiveness of microinvasive glaucoma surgery in the United States: intelligent research in sight registry analysis 2013 - 2019 [J]. *Ophthalmology*, 2023, 130 (3) : 242-255. DOI: 10.1016/j.ophtha.2022.10.021.
- [50] Gallardo MJ, Supnet RA, Ahmed I. Circumferential viscodilation of Schlemm's canal for open-angle glaucoma: ab-interno vs ab-externo canaloplasty with tensioning suture [J]. *Clin Ophthalmol*, 2018, 12 : 2493-2498. DOI: 10.2147/OPHT.S178962.

(收稿日期: 2023-12-25 修回日期: 2024-05-07)

(本文编辑: 刘艳 施晓萌)

读者 · 作者 · 编者

本刊对基金项目的证明和著录要求

文稿所涉及的课题如为国家级、部级、省级等基金资助项目,请分别用中英文表述并分别列于文章中英文摘要关键词之下,“基金项目:”进行标识,并注明基金项目名称,并在圆括号内注明基金项目编号。基金项目名称应按国家有关部门规定的正式名称填写,多个基金资助的项目请全部列出,按资助机构的等级顺序排列,并以“;”隔开。如:基金项目:国家自然科学基金(30271269);国家重点基础研究发展规划(973计划)(2013CB532002);Fund program; National Natural Science Foundation of China (30271269); National Key Basic Research Program of China(973 Program) (2013CB532002)。获得基金项目资助的论文投稿时请提供基金项目资助证明的复印件或扫描后发至编辑部信箱。

本刊征稿启事

《中华实验眼科杂志》是由中国科学技术协会主管、中华医学会主办、河南省立眼科医院承办的眼科专业学术期刊,月刊,每月10日出版。本刊的报道范围主要为眼科基础和临床研究领域领先的科研成果,主要栏目设有专家述评、实验研究、临床研究、调查研究、综述、病例报告等,学术内容涉及眼科疾病的基因学研究、基因诊断和基因靶向治疗、眼科遗传学研究、分子生物学研究、眼科微生物学研究、眼科药理学研究、眼科生物材料研究、眼科表观遗传研究、眼科疾病的动物模型、眼科疾病的流行病学研究、眼科疾病的多中心或单中心随机对照临床试验、循证医学临床实践及眼科疾病的临床研究等。本刊拟刊出海外学者的中文或英文原创性论文或评述类文章,欢迎国内外眼科研究人员踊跃投稿。

(本刊编辑部)