

· 综述 ·

房水流出通道造影技术研究进展

李丹丹¹ 综述 刘伟² 审校

¹天津市泰达医院 天津医科大学眼科医院泰达眼科中心 300457; ²天津医科大学眼科医院眼视光学院 天津医科大学眼科研究所 300384

通信作者:刘伟, Email: remmusliu@gmail.com

【摘要】 维持正常的房水流出(AHO)是眼内细胞健康和视力稳定至关重要的因素。AHO 的损伤可导致眼压升高、神经损伤并伴随青光眼的发生。了解 AHO 能更好地指导青光眼手术,促进 AHO 靶向药物的研发,进而改善 AHO 的功能。AHO 通道造影是一种与荧光素眼底血管造影类似的、应用荧光素或吲哚菁绿辅助显影 AHO 的眼前节造影技术,但其成像的是房水的排出轨迹而不是血流的运动。将造影剂引入前房,经房水循环,追踪造影剂的运动轨迹,捕捉围绕角膜缘 360° AHO 图像信息,可获得实时、动态的 AHO 影像资料。研究者先后研究了不同物种离体眼球的 AHO 特点,实时观察了非人灵长类动物活体眼球 AHO 的动态变化,并在此基础上,进一步研究了人活体眼球房水引流的运动轨迹及变化特点。AHO 通道造影技术作为一种 AHO 功能评估的新工具,为 AHO 功能研究提供了新方法,但其作为一种侵入性的检查方法,研究过程中存在很多限制因素。为了更好地理解该技术,本文就 AHO 通道造影技术的发生和发展及现状进行综述。

【关键词】 房水; 血管造影; 荧光素; 吲哚菁绿; 排出

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20190214-00053

Research progress on the aqueous angiography of aqueous humor outflow

Li Dandan¹, Liu Wei²

¹Tianjin TEDA Hospital, Tianjin Medical University Eye Hospital TEDA Eye Center, Tianjin 300457, China; ²Tianjin Medical University Eye Hospital, The School of Optometry & Ophthalmology, Tianjin Medical University Eye Institute, Tianjin 300384, China

[Abstract] Maintaining normal aqueous humor outflow (AHO) is important for intraocular cellular health and vision stabilization. AHO impairment may lead to increased intraocular pressure, optic nerve damage, and concomitant glaucoma. A heightened understanding of AHO will help to improve the glaucoma surgeries that enhance native AHO and will facilitate the development of AHO-targeted pharmaceuticals. Aqueous angiography of AHO is an anterior segment angiography technique similar to fundus fluorescein angiography. It uses fluorescein or indocyanine green to assist AHO, but the trajectory of the aqueous humor is imaged, rather than the movement of blood flow. The contrast agent is introduced into the anterior chamber, and its trajectory is tracked through the aqueous humor cycle to capture 360° aqueous effluent information around the limbus and obtain real-time and dynamic AHO image data. The researchers studied the AHO characteristics of different species of isolated eyeballs and observed the dynamic changes of AHO in non-human primates. Based on this, the trajectory and characteristics of the drainage of live human aqueous humor were further studied. Aqueous humor angiography, as a new tool for AHO functional assessment, has brought new research to AHO functions. However, as it is an invasive examination method, there are many limiting factors in the research process. To better understand the technology, this article reviews the emergence, progress, and current status of aqueous angiography.

[Key words] Aqueous humor; Angiography; Fluorescein; Indocyanine green; Outflow

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20190214-00053

房水由睫状突的无色素睫状上皮分泌产生,充满后房和前房。房水有重要的生理功能,不仅为眼部组织,如角膜、小梁网和晶状体提供必需的生物营养物质,还发挥着重要的代谢功能。房水为眼球提供流体静力压,使眼球维持着一定水的眼

压,由此球内组织结构和生理功能才能保持稳定。正常眼压依赖于房水流入和流出的平衡^[1]。房水流出 (aqueous humor outflow, AHO) 包括 2 条途径:(1)经小梁网、Schlemm 管、集合管、房水静脉进入表层巩膜静脉循环排出,称小梁网通路或常

规通路;(2)经虹膜根部、色素膜小梁网、睫状肌前表面、睫状肌束间的结缔组织间隙、脉络膜上腔进入巩膜排出,称为葡萄膜巩膜通路。小梁网通路是目前已知的 AHO 的主要途径,本文中 AHO 亦指小梁网通路。根据解剖,其大体可分为近端部分和远端部分。近端部分从前房开始,经过小梁网进入 Schlemm 管和集合管。远端部分从集合管开始,经巩膜内静脉丛,流入巩膜静脉,最后将房水引流到静脉循环。从外部看,AHO 似乎均匀地从角膜缘出发向外 360°引流房水。但是,从多个研究得到的结论看,AHO 并非是 360°均匀分布的^[2]。将标记珠引入到房水中,检测到其在小梁网中的分布是呈节段性的^[3-13],并且药物治疗能使这种分布特征发生改变^[14]。AHO 通道的节段性分布在临床微创青光眼手术(minimally invasive glaucoma surgery, MIGS)中也有体现^[15]。在 iStent 微型支架植入术和小梁消融术这 2 种手术中^[16-20],虽然手术部位通常选择在鼻侧,但眼压降低效果大相径庭,这进一步证实了 AHO 可能比我们想象的更复杂。血管造影技术在眼科领域的应用最初局限于眼底血管系统疾病,但近年来其在眼前节疾病,如新生血管性青光眼、葡萄膜炎等诊治过程中的应用也逐渐被认识^[21-22]。AHO 通道造影是一种类似于虹膜血管造影和巩膜血管造影的前段造影技术,但其成像的是房水的排出轨迹而不是血流的运动^[23-24]。将造影剂引入前房,经房水循环,追踪造影剂的运动轨迹,捕捉围绕角膜缘 360°AHO 图像信息,可以获得实时、动态的 AHO 影像资料。为了更好地理解该项技术,本文就 AHO 通道造影技术的发生和发展及现状进行综述。

1 AHO 通道造影技术的发生和发展

1.1 猪、人离体尸眼 AHO 通道造影研究

Huang 等^[23]首次选择的研究对象为猪和人的离体尸眼,造影剂为临幊上用于白内障手术囊膜染色的质量分数 2.5% 荧光素,造影设备为海德堡激光造影联合频域光相干断层扫描仪(Spectralis HRA+OCT)。实验中将眼球固定于聚苯乙烯泡沫塑料眼的钻孔中,将 Lewicky 前房维持器通过 1 mm 角膜侧切口引入至前房。灌注液为平衡盐溶液,灌注压维持在 10~30 mmHg(1 mmHg=0.133 kPa)。抽出前房水后,注入荧光素,观测并获得红外和荧光图像,收集图像信息并进行统计分析。造影结束后,用荧光标记的葡聚糖检测技术对造影活性区进行组织学分析,结果显示在猪和人尸眼的 AHO 通道造影中均采集到了高质量的显影图像。图像显示在不同象限角膜缘附近都可以看到清晰的显影信号,分布呈节段性,但各个象限间进行比较差异无统计学意义。据报道,在诸如猪的物种眼中,Schlemm 管被结构类似但更交织复杂的水样丛取代。角膜缘周围的显影区域可能代表的是 AHO 的近端部分,即小梁网/水样丛/集合管复合体。经过复合体,显影信号指向远端的房水静脉和巩膜静脉。

通过这次实验总结猪眼和人眼的 AHO 特点:AHO 呈现节段性,但是不同象限间差异不明显。从某些个体眼中还发现,近端强信号区未必对应着远端强信号区,即近端引流最强的区域不一定对应远端引流最强的区域,该研究的局限性是研究对

象为离体尸眼^[25]。在尸眼中,巩膜静脉被切断,造影剂最终经巩膜静脉到达眼表,无法通过静脉系统流向体循环,这可能是显影信号随时间逐渐增强并趋于平稳的原因。使用尸眼的局限性还包括细胞死亡后活力遭破坏、巩膜静脉血液凝固和灌注使组织肿胀,这些均可能使显影信号呈现节段性。

1.2 牛离体尸眼双造影剂 AHO 通道造影研究

对于 AHO 的研究,房水是研究的重点。房水中含有不同的物质,不同的造影剂有不同的分子特性,所以不同的造影剂可能会使造影信号呈现不同的运动轨迹。水的相对分子质量为 18,荧光素的相对分子质量为 332,荧光素是目前已知的水的最佳显影剂。吲哚菁绿(indocyanine green, ICG)的相对分子质量为 775,与荧光素相比有其自身优势。其易与蛋白质结合,在管腔内存留时间长,是蛋白质最佳的显影剂。在眼底血管造影中,ICG 能更好地显影脉络膜^[26];在 AHO 通道造影中,ICG 能更清楚地显影前段 AHO 解剖结构及细节。为了证明 AHO 的节段性显影特点不是造影剂造成的,Huang 等^[27]团队选择使用 ICG 和荧光素 2 种造影剂对另一物种——奶牛的离体尸眼进行了 AHO 通道造影实验,结果显示 2 种造影剂的 AHO 显影信号都表现节段性。与荧光素相比,ICG 显影时间更长,并且 ICG 没有渗漏到巩膜表面,分析原因可能与 ICG 本身的分子特性有关,也可能与其浓度较低有关(浓度受其在盐水溶液中溶解度的限制。此处选择的荧光素和 ICG 的浓度是基于临幊上白内障手术中囊膜染色时的浓度)^[28-29]。Huang 等^[27]研究证实了 AHO 节段性分布的特点不是物种的原因,也与造影剂的特性无关。

1.3 活体非人类灵长类动物(恒河猴)眼 AHO 通道造影研究

要理解完整、系统、实时的 AHO 系统,有必要在活体上实施 AHO 通道造影。通过了动物保护委员会的批准,在周密和严谨的实验设计下,AHO 通道造影首次在非人类灵长类动物(non-human primates, NHPs)——恒河猴活体上实施^[30]。实验对象包括 6 只成年(5 只雄性和 1 只雌性)恒河猴(NHP A-F),Huang 等^[30]将 Spectralis HRA+OCT 经过改进后安装了功能齐全的手术臂,可以采集坐位、倾斜位、侧卧位、仰卧位和俯卧位的图像。研究中使用 ICG 和荧光素 2 种造影剂对 NHP 同一只眼进行造影并采集图像,并且整个实验过程在动物专用手术室内完成。该研究结果显示,在 NHP 活体眼中 AHO 同样呈现为节段性;与尸眼造影结果相似^[25,27,31-32],在角膜缘附近,显影信号阳性区与阴性区交叉存在,并向远处延伸;实验还发现,尽管造影过程中使用恒压系统对造影剂进行输入,但仍能观察到信号搏动样运动^[30]。搏动的速率为 57~185 次/min,平均(120±52)次/min。虽然此过程中并未同时监测 NHP 的心率,但视频短片中记录的信号的搏动频率与恒河猴的平均心率相近,所以怀疑这种搏动动力的来源是心脏。

在完整的活体眼实验中,AHO 显影始终呈现为节段性,并随时间趋于稳定。但显影信号并不是一成不变的,例如在 NHP-B 一个约 10 s 的连续图像中,起初出现在上方的显影信号随时间逐渐向鼻侧运动;早期无信号的区域逐渐出现信号,而早期信号强的区域信号也可能逐渐消失(图 1)。经统计,在这

个约 500 s 的造影视频记录中,在眼的不同位置共观察到 16 个动态变化。这种动态变化区别于搏动样运动,因为这是造影模式体现在物理位置上的移动,而不是在稳定管腔内信号强度的变化。也就是说,AHO 显影整体上呈现节段性,节段性处于动态变化中,而且信号强度也有搏动样变化。

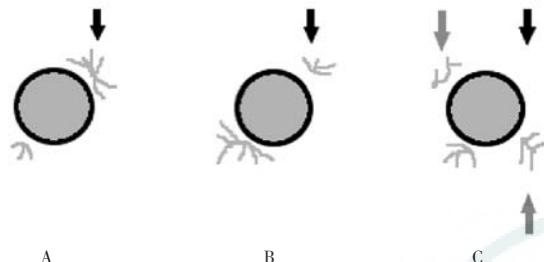


图 1 NHP 活体眼中 AHO 显影示意图 黑色箭头示早期显影强信号区随时间信号逐渐消失;灰色箭头示早期无信号区域在晚期出现显影信号。NHP 活体眼中房水显影信号呈现节段性分布

Figure 1 Schematic diagram of AHO in intravitral NHP subjects
Black arrows showed that early strong angiographic signal areas disappeared with time. The gray arrows showed that areas that were once unsigned at an early stage showed signs of signal at a later stage. Segmental angiographic patterns were seen in intact living NHP eyes

1.4 活体人眼 AHO 通道造影研究

尽管 AHO 通道造影已在活体 NHP 的研究中实施,但并不能证明造影剂引入活体人眼前房中是安全的。以往的经验告诉我们,任何药剂输送至有晶状体眼的前房内都是有风险的,可能对视力造成极大的威胁,如可能造成晶状体前囊膜穿孔、晶状体颗粒性青光眼、无菌性眼内炎、前房出血、玻璃体积血等。为将风险降至最低,试验选择在白内障患者进行超声乳化白内障摘出手术时进行。经过患者的同意,手术中从角膜侧切口将 Lewicky 前房维持器引入前房,维持眼压在 18.7 mmHg。抽出前房水,注入造影剂(质量分数 0.4% ICG),完成造影并进行图像采集。试验结束后,去除前房维持器,吸出造影剂,常规完成超声乳化白内障摘出手术。研究中同时应用红外线共聚焦激光扫描检眼镜技术(confocal scanning laser ophthalmoscope-infrared, cSLO-IR)和眼前节 OCT 与显影信号进行实时比对,证实显影信号来源于 AHO 系统。该试验结果与前期实验结果具有良好的一致性。试验发现 8 名受试者造影图像均呈现出 AHO 的节段性和显影信号的搏动样运动^[33],并且还发现最强的信号都出现在鼻侧。此外,在人眼的实时动态显影影像中也观察到了血管搏动样运动之外的动态变化^[32-33]。这种动态变化表现为:在造影早期有些区域无信号,随时间显影信号逐渐出现并增强;有些区域早期为强信号,后期信号逐渐衰减甚至消失。到目前为止,调节这种动态变化的机制尚不清楚。可能是因为 AHO 远端部分已经具备血管成分,有局部收缩能力;或者,小梁网的局部调控机制在其中发挥作用。总之,动态 AHO 是一个独特的发现,可能存在新的流量调节点对 AHO 进行调控。这种动态变化也证实了低流量区可能不是永久性的,而且是可以通过适当的操作改变的,这为小梁网旁路手术提供了理论依据^[31]。

2 AHO 通道造影技术的应用

MIGS 是一种新型的青光眼手术方式。与传统青光眼手术相比,其降眼压效果好,并发症少。然而,目前 MIGS 在临幊上并没有被广泛应用,主要原因是手术效果的不确定性^[16-17]。分析其原因,除术者的手术娴熟度外,更可能的原因是 AHO 不是 360°均匀分布的。由此,小梁 MIGS 最佳手术位置的选择至关重要。如果术前可以通过 AHO 通道造影技术检测出 AHO 最佳或最差区域,为手术部位的选择提供参考,或许能提高手术成功率。除此之外,双造影剂 AHO 通道造影可用于手术、激光或药物有效性的检验^[27]。目前, Huang 等^[30]应用此技术进行实验,对人尸眼小梁旁路支架手术效果进行验证。

3 小结

AHO 通道造影技术作为一种侵入性的检查方法,研究过程中存在很多限制因素:(1)检测过程不符合生理过程。造影剂被输送至前房,进入房水循环,并通过瞳孔进入后房,这种非生理性输入可能导致前房和房角加深加大;(2)开睑器和角膜牵引线的应用可能对眼球产生非生理性矢量力;(3)白内障术前药物扩瞳阻断了眼部副交感神经的兴奋,可能会造成小梁网容量的改变;(4)AHO 通道造影属于有创操作,需要在无菌条件下进行,目前手术室仍是进行 AHO 通道造影术最安全的地方。此外,造影剂输入进前房可能会对视力造成毁灭性的伤害,这是无法完全避免的,这也可能是 AHO 通道造影技术在临幊工作中被常规化应用的最大阻碍之一。

AHO 通道造影技术作为一种新出现的 AHO 的检测手段,目前仍处在实验研究阶段。未来临幊实施过程中会遇到更多问题及困难。随实验的改进,困难终将逐渐被克服。就如同视网膜血管造影技术一样,最初是一种繁琐的检查方法,随时间进化后变得流水线化,逐渐被广泛应用。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Brubaker RF. Goldmann's equation and clinical measures of aqueous dynamics[J]. Exp Eye Res, 2004, 78(3): 633-637. DOI: 10.1016/j.exer.2003.07.002.
- [2] Swaminathan SS, Oh DJ, Kang MH, et al. Aqueous outflow: segmental and distal flow[J]. J Cataract Refract Surg, 2014, 40(8): 1263-1272. DOI: 10.1016/j.jcrs.2014.06.020.
- [3] Chang JY, Folz SJ, Laryea SN, et al. Multi-scale analysis of segmental outflow patterns in human trabecular meshwork with changing intraocular pressure [J]. J Ocul Pharmacol Ther, 2014, 30(2-3): 213-223. DOI: 10.1089/jop.2013.0182.
- [4] Sabanay I, Gabelt BT, Tian B, et al. H-7 effects on the structure and fluid conductance of monkey trabecular meshwork [J]. Arch Ophthalmol, 2000, 118(7): 955-962.
- [5] 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.
- [6] Swaminathan SS, Oh DJ, Kang MH, et al. Secreted protein acidic and rich in cysteine (SPARC)-null mice exhibit more uniform outflow [J].

- Invest Ophthalmol Vis Sci, 2013, 54(3) : 2035–2047. DOI: 10.1167/iovs.12-10950.
- [7] Hann CR, Bahler CK, Johnson DH. Cationic ferritin and segmental flow through the trabecular meshwork [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2005, 46(1) : 1–7. DOI: 10.1167/iovs.04-0800.
- [8] Ethier CR, Chan DW. Cationic ferritin changes outflow facility in human eyes whereas anionic ferritin does not [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2001, 42(8) : 1795–1802.
- [9] Keller KE, Bradley JM, Vranka JA, et al. Segmental versican expression in the trabecular meshwork and involvement in outflow facility [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2011, 52(8) : 5049–5057. DOI: 10.1167/iovs.10-6948.
- [10] Lu Z, Overby DR, Scott PA, et al. The mechanism of increasing outflow facility by rho-kinase inhibition with Y-27632 in bovine eyes [J]. Exp Eye Res, 2008, 86(2) : 271–281. DOI: 10.1016/j.exer.2007.10.018.
- [11] Braakman ST, Read AT, Chan DW, et al. Colocalization of outflow segmentation and pores along the inner wall of Schlemm's canal [J]. Exp Eye Res, 2015, 130 : 87–96. DOI: 10.1016/j.exer.2014.11.008.
- [12] Yang CY, Liu Y, Lu Z, et al. Effects of Y27632 on aqueous humor outflow facility with changes in hydrodynamic pattern and morphology in human eyes [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2013, 54(8) : 5859–5870. DOI: 10.1167/iovs.12-10930.
- [13] Vranka JA, Bradley JM, Yang YF, et al. Mapping molecular differences and extracellular matrix gene expression in segmental outflow pathways of the human ocular trabecular meshwork [J/OL]. PLoS One, 2015, 10(3) : e0122483 [2019-08-10]. <https://journals.plos.org/pone/article?id=10.1371/journal.pone.0122483>. DOI: 10.1371/journal.pone.0122483.
- [14] Overby DR, Stamer WD, Johnson M. The changing paradigm of outflow resistance generation: towards synergistic models of the JCT and inner wall endothelium [J]. Exp Eye Res, 2009, 88(4) : 656–670. DOI: 10.1016/j.exer.2008.11.033.
- [15] Johnson DH, Johnson M. Glaucoma surgery and aqueous outflow: how does nonpenetrating glaucoma surgery work? [J]. Arch Ophthalmol, 2002, 120(1) : 67–70. DOI: 10.1001/archophth.120.1.67.
- [16] Craven ER, Katz LJ, Wells JM, et al. Cataract surgery with trabecular micro-bypass stent implantation in patients with mild-to-moderate open-angle glaucoma and cataract: two-year follow-up [J]. J Cataract Refract Surg, 2012, 38(8) : 1339–1345. DOI: 10.1016/j.jcrs.2012.03.025.
- [17] Minckler D, Mosaed S, Dustin L, et al. Trabectome (trabeculectomy-internal approach): additional experience and extended follow-up [J]. Trans Am Ophthalmol Soc, 2008, 106 : 149–160.
- [18] Samuelson TW, Katz LJ, Wells JM, et al. Randomized evaluation of the trabecular micro-bypass stent with phacoemulsification in patients with glaucoma and cataract [J]. Ophthalmology, 2011, 118(3) : 459–467. DOI: 10.1016/j.ophtha.2010.07.007.
- [19] Ahmed II, Katz LJ, Chang DF, et al. Prospective evaluation of microinvasive glaucoma surgery with trabecular microbypass stents and prostaglandin in open-angle glaucoma [J]. J Cataract Refract Surg, 2014, 40(8) : 1295–1300. DOI: 10.1016/j.jcrs.2014.07.004.
- [20] Ahuja Y, Ma Khin Pyi S, Malihhi M, et al. Clinical results of ab interno trabeculotomy using the trabectome for open-angle glaucoma: the Mayo Clinic series in Rochester, Minnesota [J]. Am J Ophthalmol, 2013, 156(5) : 927–935. DOI: 10.1016/j.ajo.2013.06.001.
- [21] 李士清, 王志立, 李萍, 等. 荧光素虹膜血管造影联合眼底血管造影在DR合并新生血管性青光眼中的应用[J]. 中华实验眼科杂志, 2016, 34(12) : 1112–1115. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2016.12.013.
- Li SQ, Wang ZL, Li P, et al. Application of iris fluorescein angiography combined with fundus fluorescein angiography in diabetic retinopathy with neovascular glaucoma [J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2016, 34(12) : 1112–1115. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2016.12.013.
- [22] 崔颖, 罗光伟, 谢楚芳, 等. 虹膜荧光素血管造影对具有棕色虹膜的中国人前葡萄膜炎的诊断价值 [J]. 中华实验眼科杂志, 2012, 30(7) : 625–628. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2012.07.013.
- Cui Y, Luo GW, Xie CF, et al. Clinical value of iris fluorescein angiography in diagnosis of uveitis in Chinese with brown iris [J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2012, 30(7) : 625–628. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2012.07.013.
- [23] Cobb B. Vascular tufts at the pupillary margin: a preliminary report on 44 patients [J]. Trans Ophthalmol Soc U K, 1969, 88 : 211–221.
- [24] Marvasti AH, Berry J, Sibug ME, et al. Anterior segment scleral fluorescein angiography in the evaluation of ciliary body neoplasm: two case reports [J]. Case Rep Ophthalmol, 2016, 7(1) : 30–38. DOI: 10.1159/000443603.
- [25] Saraswathy S, Tan JC, Yu F, et al. Aqueous angiography: real-time and physiologic aqueous humor outflow imaging [J/OL]. PLoS One, 2016, 11(1) : e0147176 [2019-09-11]. <https://journals.plos.org/pone/article?id=10.1371/journal.pone.0147176>. DOI: 10.1371/journal.pone.0147176.
- [26] Keane PA, Sadda SR. Imaging chorioretinal vascular disease [J]. Eye (Lond), 2010, 24(3) : 422–427. DOI: 10.1038/eye.2009.309.
- [27] Huang AS, Saraswathy S, Dastiridou A, et al. Aqueous angiography with fluorescein and indocyanine green in bovine eyes [J/OL]. Transl Vis Sci Technol, 2016, 5(6) : 5 [2019-09-01]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5106193/>. DOI: 10.1167/tvst.5.6.5.
- [28] Alander JT, Kaartinen I, Laakso A, et al. A review of indocyanine green fluorescent imaging in surgery [J/OL]. Int J Biomed Imaging, 2012, 2012 : 940585 [2019-09-10]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3346977/>. DOI: 10.1155/2012/940585.
- [29] Jacobs DS, Cox TA, Wagoner MD, et al. Capsule staining as an adjunct to cataract surgery: a report from the American Academy of Ophthalmology [J]. Ophthalmology, 2006, 113(4) : 707–713. DOI: 10.1016/j.ophtha.2006.01.024.
- [30] 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.
- [31] Huang AS, Saraswathy S, Dastiridou A, et al. Aqueous angiography-mediated guidance of trabecular bypass improves angiographic outflow in human enucleated eyes [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2016, 57(11) : 4558–4565. DOI: 10.1167/iovs.16-19644.
- [32] Huang AS, Mohindroo C, Weinreb RN. Aqueous humor outflow structure and function imaging at the bench and bedside: a review [J/OL]. J Clin Exp Ophthalmol, 2016, 7(4) : 578 [2019-09-15]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5079182/>. DOI: 10.4172/2155-9570.1000578.
- [33] Huang AS, Camp A, Xu BY, et al. Aqueous angiography: aqueous humor outflow imaging in live human subjects [J]. Ophthalmology, 2017, 124(8) : 1249–1251. DOI: 10.1016/j.ophtha.2017.03.058.

(收稿日期: 2019-11-16 修回日期: 2020-02-26)

(本文编辑: 刘艳)