

不同彩色多普勒成像设备测量球后血流动力学参数比较

丁雨溪¹, 唐凯莉^{1,2}, 武彬¹, 许造良³, 白宇石¹, 马立威^{1,2}

(1. 沈阳爱尔卓越眼科医院眼科, 沈阳 110003; 2. 安徽医科大学附属爱尔眼科医院眼科, 合肥 230000; 3. Department of Biology, University of California, Irvine 92697)

摘要 目的 评估2种不同型号彩色多普勒成像(CDI)设备测量球后血流动力学参数的差异性和一致性。方法 选取2022年9月至12月沈阳爱尔卓越眼科医院招募的健康志愿者50例(99眼),使用Apogee 3500型(Apogee组)和Esaote MyLab 7 eHD型(Esaote组)这2种CDI设备进行眼部测量。收集眼动脉(OA)、视网膜中央动脉(CRA)和睫状后短动脉(SPCA)的收缩期峰值流速(PSV)、舒张末期流速(EDV)和阻力指数(RI)参数值。采用配对t检验比较2组的差异性,用Bland-Altman方法比较2组的一致性,并计算一致性相关系数(CCC)。结果 Apogee组OA、CRA、SPCA的PSV、EDV值高于Esaote组差异有统计学意义($P < 0.05$)。Apogee组CRA和SPCA的RI值低于Esaote组,差异有统计学意义($P < 0.05$)。CCC的整体一致性(0.136~0.517)程度较差。结论 Apogee和Esaote这2种CDI设备对球后血流动力学参数测量存在差异性,且一致性欠佳,即使由同一位经验丰富的超声医生连续重复测量,CDI设备间的重复性仍不可靠。

关键词 彩色多普勒成像; 球后血管; 血流动力学参数; 一致性

中图分类号 R770.4 文献标志码 B 文章编号 0258-4646(2025)01-0051-05

网络出版地址 <https://link.cnki.net/urlid/21.1227.R.20250109.1102.008>

DOI:10.12007/j.issn.0258-4646.2025.01.009

Inter-device comparative analysis of color Doppler imaging retrobulbar hemodynamic measurements

DING Yuxi¹, TANG Kaili^{1,2}, WU Bin¹, HSU Chaoliang³, BAI Yushi¹, MA Liwei^{1,2}

(1. Department of Ophthalmology, Shenyang Aier Excellence Eye Hospital, Shenyang 110003, China; 2. Department of Ophthalmology, Aier Eye Hospital Affiliated to Anhui Medical University, Hefei 230032, China; 3. Department of Biology, University of California, Irvine 92617, United States of America)

Abstract Objective To compare blood flow velocity measurements obtained using two different color Doppler imaging (CDI) devices with linear probes of varying frequencies. **Methods** CDI measurements were performed in 99 eyes of 50 participants from Shenyang Aier Excellent Eye Hospital using two different CDI devices, Apogee Type3500 and Esaote MyLab 7 eHD. These measurements included peak systolic velocity (PSV), end-diastolic velocity (EDV), and resistance index (RI) of the ophthalmic artery (OA), central retinal artery (CRA), and short posterior ciliary arteries (SPCA). The differences in measurements between the two devices were analyzed using a paired *t*-test. The level of agreement between the two CDI devices was calculated using the Bland-Altman method, and the concordance correlation coefficient (CCC) was calculated. **Results** There was a statistically significant difference between the two CDI devices in the PSV, EDV of the OA, CRA, and SPCA, and RI of the CRA and SPCA. The PSV and EDV of each vessel were higher in Apogee than in Esaote, and the RI of the CRA and SPCA were lower for Apogee than for Esaote ($P < 0.05$). The CCC demonstrated poor overall concordance ranging from 0.136 to 0.517. **Conclusion** The consistency of most measurements obtained from both devices is poor. CDI inter-device reproducibility is unreliable, even when the measurements are conducted consecutively by a single experienced ultrasonographer.

Keywords color Doppler imaging; retrobulbar blood vessel; hemodynamic parameter; consistency

正常的血液供应对于维持眼球生理功能十分重要,全身及眼部的多种因素均可影响眼部血液供应,损害视功能^[1-7]。目前,评估眼部血流的方法有

很多种^[6-7],而彩色多普勒成像(color Doppler imaging, CDI)^[8-9]检查因其具有设备较易获得、价格适中、非侵入性的特点,成为眼科最常用的眼部血流评估技术,广泛应用于眼部疾病的诊断、评估和疾病进展预测^[3,10-11]。不同CDI设备成像模式包括传统的线阵成像和超快复合相干平面波成像^[12]。即使是具有相同成像模式的CDI设备也配备了不同频率范围的探头。有文献^[13-16]报道了相同CDI设备测量球后血流动力学参数观察者内部和观察者间的一致性

基金项目:湖南省自然科学基金(2023JJ70040);爱尔眼科医院集团科研基金(AC2214D01);爱尔眼科医院集团临床研究所科研基金(AR2102D1)

作者简介:丁雨溪(1990-),女,主治医师,硕士。

通信作者:马立威, E-mail: maliwei@aierchina.com

收稿日期:2024-03-12

网络出版时间:2025-01-09 15:09:07

高度重复性的结果,而关于不同设备间一致性的研究^[17-19]较少。本研究比较了2种不同CDI设备(分别使用不同频率线性探头)获得的球后血流动力学参数,并分析其一致性。

1 材料与方法

1.1 一般资料

选择2022年9月至12月沈阳爱尔卓越眼科医院招募的健康志愿者(50例,99眼)作为研究对象。其中,男12例(24眼),女38例(75眼),年龄18~54岁,平均(37.62 ± 12.48)岁。纳入标准:无眼部疾病;年龄18~60岁;能够配合检查。排除标准:有眼部疾病;最佳矫正视力<1.0;眼压>21 mmHg;全身系统性疾病;正在使用局部或全身性药物;无诱因的CDI图形波峰呈反向。受试者被要求在进CDI检查的当天避免吸烟、摄入咖啡因和剧烈运动,以尽量减少这些因素对血流速度的影响。由于1例志愿者的左眼CDI图形波峰呈反向,故排除后共计纳入本研究99眼。所有研究对象签署知情同意书。本研究获得沈阳爱尔卓越眼科医院伦理委员会批准(2022KJB003)。

1.2 CDI测量方法

由同一位经验丰富的超声影像科医师进行所有球后血流动力学参数测量。对50例受试者分别使用2种CDI设备测量双眼眼动脉(ophthalmic artery, OA)、视网膜中央动脉(central retinal artery, CRA)和睫状后短动脉(short posterior ciliary artery, SPCA)的全部球后血流动力学参数。2种CDI设备分别为Esaote MyLab 7 eHD[线性探头SL1543,频率5.6 MHz,百胜(深圳)医疗设备有限公司]和Apogee 3500型(线性探头L8L38C,频率8.0 MHz,汕头市超声检测科技有限公司)。随机确定CDI设备和眼别的先后顺序。正式测量前,受试者仰卧位休息10 min。按照MODRZEJEWSKA等^[20]的CDI测量方案进行测量:受试者取仰卧位,平视前方,轻闭双眼,上眼睑均匀涂抹适量耦合剂,检查者保持于稳定位置,手握探头轻置于受试者眼脸上,避免对眼球施加任何压力。

球后血管的识别:(1)OA位于眼眶深处,沿视神经呈“S”形,在穿过视神经后的位置进行测量;(2)CRA在眼球后壁外测量,CRA及其静脉不能单独测量,因此,通过零刻度线以上的动脉波形和反向静脉波形获得双波形;(3)SPCA位于视神经两侧,在尽

可能靠近视神经的位置,本研究中取视神经暗区颞侧球后约3.5~6.0 mm处检测。SPCA只产生均匀的动脉脉搏。

根据所用设备分为Apogee组和Esaote组。分别测量OA、CRA和SPCA的峰值收缩期速度(peak systolic velocity, PSV)、舒张末期速度(end-diastolic velocity, EDV)和血流阻力指数(resistance index, RI)。对每条血管测量3次并获得合格的图像,记录3次检查结果的平均值。

1.3 统计学分析

采用SPSS 22.0软件和MedCalc 12.3.0.0软件^[21]对数据进行统计分析。采用Shapiro-Wilk检验检测计量资料的正态性,符合正态分布的计量资料用 $\bar{x} \pm s$ 表示。采用配对 t 检验比较2种设备测量值的差异, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。采用Bland-Altman检验比较2种设备测量值的一致性,并计算一致性相关系数(concordance correlation coefficient, CCC)。CCC = Pearson's ρ (精密性) × C_b(准确度)。

2 结果

2.1 2种CDI设备测量球后血流动力学参数的差异性比较

2种CDI设备测得的球后血流动力学参数均值如表1所示,Apogee组OA、SPCA、CRA的PSV和EDV值均高于Esaote组,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$)。Apogee组CRA和SPCA的RI值均低于Esaote组,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$)。

2.2 2种CDI设备测量球后血流动力学参数的一致性分析

表2所示为2种设备测得每条血管的血流速度和RI的平均值以及设备间的一致性。Bland-Altman分析结果如图1所示,2种设备测量OA、CRA、SPCA的RI一致性较好,CRA和SPCA的EDV一致性较好,其余测量结果一致性欠佳。此外,总体一致性(CCC: 0.136~0.517)程度较差,说明2种CDI设备间再现性不可接受。虽然其准确度较高(C_b, 0.723~0.968),但总体精密性较低(Pearson's ρ , 0.189~0.593)。

3 讨论

自20世纪80年代CDI设备首次应用于眼科以来,已逐渐推广普及至各级医院。不同制造商生产的

CDI设备,无论是传统的线阵成像模式,还是超快复合相干平面波成像模式,都配备了不同超声频率的探头。选择不同频率的超声多普勒探头需要权衡分辨率和测量深度。高频探头优先获得较高的图像分辨率,但图像深度受到限制。在已发表的有关球后血流研究^[20]中使用的探头频率范围为2~13 MHz。用于球后血流检测的CDI设备最常选用7.5 MHz探头。在如此宽的频率范围内,CDI设备测量球后血流参数的差异很大^[20,22]。由于这些测量值的高度变异

性,CDI设备的可重复性引起研究者的关注。但以往的研究^[13-16]中,大多数是关于设备操作者内部和操作者间的可重复性。为了尽量减少CDI设备测量的主观性,操作人员按照标准CDI设备操作方案进行测量,要求在使用相同CDI设备的同一个体上应连续或在非常短的间隔内完成测量。研究^[13-16]表明,操作者内部和操作者间的差异都在可接受的范围内。当采用单盲方式由同一阅片者读取检测所得血流参数频谱结果时,操作者间的一致性甚至更高^[15]。

表1 2种设备测得球后血流速度参数比较

Tab.1 Comparison of the retrobulbar blood flow velocity measured by the 2 devices

Device	PSV (cm/s)			EDV (cm/s)			RI		
	OA	CRA	SPCA	OA	CRA	SPCA	OA	CRA	SPCA
Apogee (8.0 MHz)	32.63 ± 6.90	11.73 ± 2.15	12.30 ± 2.20	8.11 ± 2.21	4.88 ± 0.77	5.01 ± 0.93	0.74 ± 0.08	0.58 ± 0.07	0.59 ± 0.07
Esaote (5.6 MHz)	29.35 ± 6.44	10.58 ± 2.12	11.48 ± 2.50	7.25 ± 2.23	4.16 ± 1.22	4.30 ± 1.12	0.75 ± 0.06	0.61 ± 0.09	0.62 ± 0.09
<i>t</i>	5.17	5.95	2.94	3.82	5.41	6.32	-1.48	-2.86	-4.07
<i>P</i>	<0.001	<0.001	0.004	<0.001	<0.001	<0.001	0.142	0.005	<0.001

OA, ophthalmic artery; CRA, central retinal artery; SPCA, short posterior ciliary artery; PSV, peak systolic velocity; EDV, end-diastolic velocity; RI, resistance index.

表2 CDI设备测量球后血流速度参数变异性分析

Tab.2 Summary of variability data for color Doppler imaging of the retrobulbar blood flow velocity

Item	Bland-Altman LOA	Percentage out of the 95% LOA (%)	CCC	CCC 95%CI	Pearson's ρ (precision)	C_b (accuracy)
PSV (cm/s)						
PSV-OA	-9.1-15.6	4.04	0.496	0.348-0.617	0.556	0.890
PSV-CRA	-2.6-4.9	8.08	0.517	0.377-0.634	0.593	0.872
PSV-SPCA	-4.7-6.3	6.06	0.275	0.096-0.437	0.295	0.934
EDV (cm/s)						
EDV-OA	-3.6-5.3	7.07	0.445	0.285-0.582	0.480	0.928
EDV-CRA	-1.9-3.3	3.03	0.136	-0.007-0.274	0.189	0.723
EDV-SPCA	-1.5-2.9	5.05	0.317	0.168-0.452	0.403	0.788
RI						
RI-OA	-0.17-0.15	3.03	0.372	0.196-0.525	0.385	0.968
RI-CRA	-0.23-0.17	3.03	0.185	0.011-0.348	0.209	0.887
RI-SPCA	-0.19-0.13	4.04	0.441	0.286-0.574	0.491	0.889

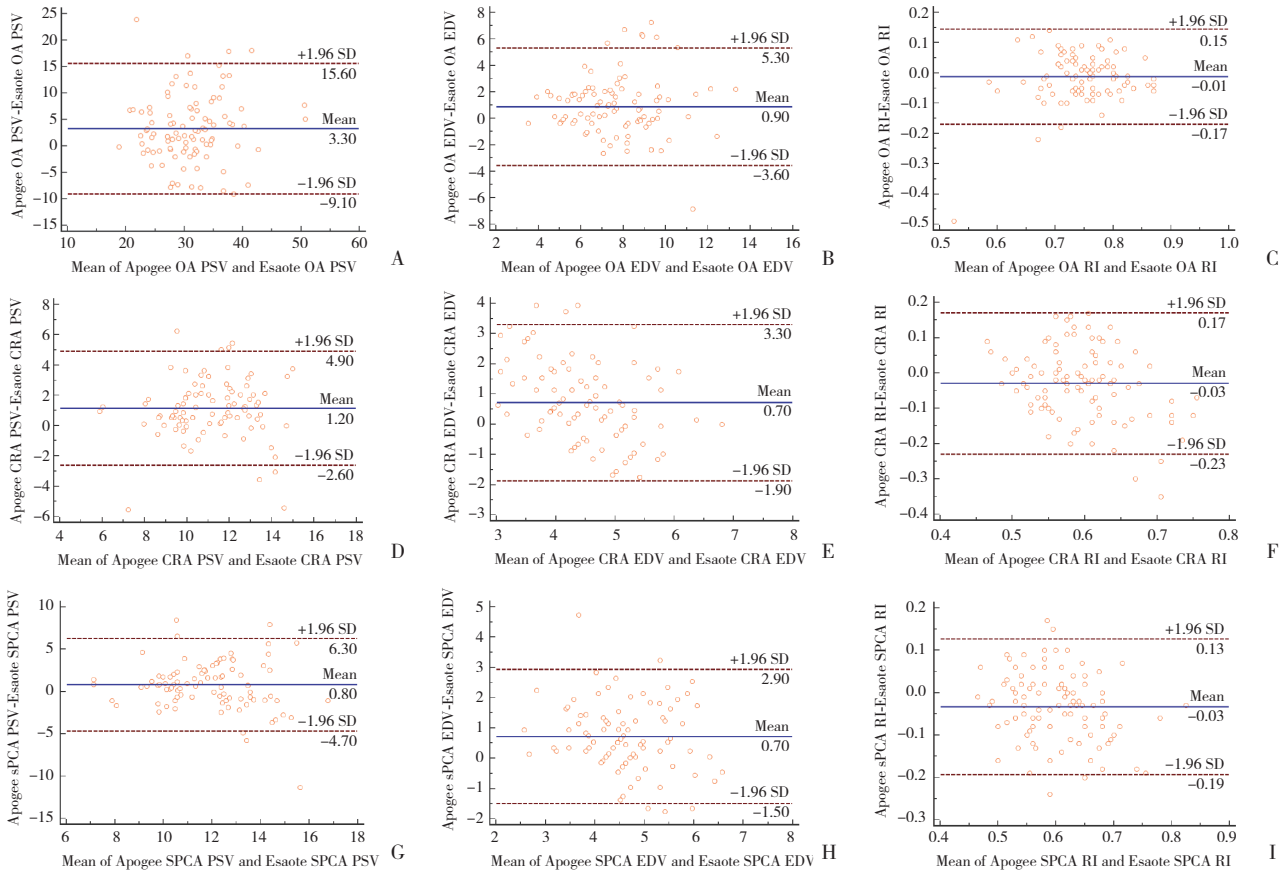
CCC, concordance correlation coefficient; Pearson's ρ , Pearson correlation coefficient; C_b, bias correction factor; LOA, limits of agreement.

然而,当比较不同的CDI设备或不同频率的探头时,结果的可靠性较差。BOEHM等^[17]的研究中,共纳入19例(31眼),其中3眼为原发性开角型青光眼,4眼为可疑青光眼,24眼正常,采用相同的CDI设备及2个不同频率的探头进行检测,结果显示,7.5

MHz探头测量的参数略高于12 MHz探头测量的参数,其中4个参数(颞侧SPCA的EDV、PSV, CRA和鼻侧SPCA的RI)差异显著。而本研究纳入了50例健康受试者(99眼),结果与其相反,发现8.0 MHz探头的血流动力学参数高于5.6 MHz探头;除OA的RI外,

所有差异均有统计学意义。这一差异可能来自本研究中使用的2种CDI设备。不同制造商生产的CDI设备配备了不同的传感器、参数转换公式及不同频率

的探头,所有这些技术差异都导致了测量结果的差异。由于不同设备的计算方法有所不同,很难对这些设备的测量结果进行比较。



A to C, Bland-Altman plots of PSV, EDV, and RI of OA; D to F, Bland-Altman plots of PSV, EDV, and RI of CRA; G to I, Bland-Altman plots of PSV, EDV, and RI of SPCA.

图1 2种设备测量球后血流动力学参数的Bland-Altman一致性分析
Fig.1 Bland-Altman agreement analysis between devices

当使用不同的CDI设备时,探头频率产生的微小变化可忽略不计。有文献^[19]报道,4名检查人员(2名眼科医生和2名放射科医生)使用2种不同的CDI设备对10名健康受试者的右眼进行CDI检查,结果显示,使用不同的CDI设备分析结果可靠性不佳,与本研究结果一致。在测量球后血流速度时,本研究2个CDI设备的参数均不一致,这看似与Bland-Altman方法中3条血管的RI一致性结果存在冲突,2种CDI设备的3条血管RI一致性较好。这可能是由于RI是由每条血管的血流动力学参数分别计算得出,即 $RI = (PSV - EDV) / PSV$ ^[20],从而致了配备不同频率探头的几种CDI设备虽然测量所得血流速度值有差异,但最终得出的RI却相同。然而,球后血管RI的临

床意义存在局限性,RI值与血管阻力的相关性还有待证实。

CDI技术本身存在局限性,即测量结果依赖于操作者和设备条件,本研究结果证实了这一点。本研究中,1名经验丰富的超声影像科医生是唯一的操作者,CDI测量按照标准化方案进行,但设备间重复性却较差。目前,临床中使用的CDI设备大多针对的是比球后血管更粗大的动脉,如颈部动脉。如欲获得眼部血管中更精确的测量值,需要调整和统一CDI设备的设置,并尽量减少设备变化。对操作人员进行强化培训,设计严格的测量操作流程,由独立阅片者对CDI血流参数频谱进行分析,将有助于提高CDI测量的操作者内部和操作者间的可靠性。

本研究为单中心研究,仅有50例健康志愿者参与,存在一定的局限性。因此,进一步深入研究需多中心设计,标准化训练操作人员,以及扩大样本量,以发现测量球后血流动力学参数的最佳CDI设备配置。

参考文献:

- [1] MARJANOVIĆ I, MARJANOVIĆ M, MARTINEZ A, et al. Relationship between blood pressure and retrobulbar blood flow in dipper and nondipper primary open-angle glaucoma patients [J]. *Eur J Ophthalmol*, 2016, 26 (6) : 588-593. DOI: 10.5301/ejo.5000789.
- [2] XUE K, LIU AL, HUI R, et al. Retrobulbar ocular blood flow changes measured by colour Doppler imaging after intra-arterial chemotherapy in retinoblastoma [J]. *Br J Ophthalmol*, 2017, 101 (10) : 1419-1422. DOI: 10.1136/bjophthalmol-2016-310056.
- [3] KANAGARAJU V, DIVYA K, RAAJAGANESH M, et al. Evaluation of resistive index of orbital vessels using color Doppler imaging in patients with type 2 diabetes mellitus [J]. *J Med Ultrasound*, 2020, 29 (2) : 111-115. DOI: 10.4103/JMU.JMU_88_20.
- [4] BÖHM EW, PFEIFFER N, WAGNER FM, et al. Methods to measure blood flow and vascular reactivity in the retina [J]. *Front Med*, 2023, 9: 1069449. DOI: 10.3389/fmed.2022.1069449.
- [5] OZATES S, DERINKUYU BE, ELGIN U, et al. Early ophthalmic artery blood flow parameter changes in patients with type 1 diabetes mellitus [J]. *Beyoglu Eye J*, 2020, 5 (1) : 17-21. DOI: 10.14744/bej.2020.15238.
- [6] GRUDZIŃSKA E, MODRZEJEWSKA M. Modern diagnostic techniques for the assessment of ocular blood flow in myopia; current state of knowledge [J]. *J Ophthalmol*, 2018, 2018: 4694789. DOI: 10.1155/2018/4694789.
- [7] MOHINDROO C, ICHHPUJANI P, KUMAR S. Current imaging modalities for assessing ocular blood flow in glaucoma [J]. *J Curr Glaucoma Pract*, 2016, 10 (3) : 104-112. DOI: 10.5005/jp-journals-10008-1210.
- [8] BÖHM EW, GRAUHAN NF, PFEIFFER N, et al. Measurement of retrobulbar blood flow and vascular reactivity-relevance for ocular and cardiovascular diseases [J]. *Diagnostics*, 2023, 13 (23) : 3514. DOI: 10.3390/diagnostics13233514.
- [9] BITTNER M, FAES L, BOEHNI SC, et al. Colour Doppler analysis of ophthalmic vessels in the diagnosis of carotic artery and retinal vein occlusion, diabetic retinopathy and glaucoma: systematic review of test accuracy studies [J]. *BMC Ophthalmol*, 2016, 16 (1) : 214. DOI: 10.1186/s12886-016-0384-0.
- [10] NOURELDINE AM, ABDELMAKSOUH AMS, MOSTAFA HAAF, et al. Orbital blood vessels changes on color duplex imaging in diabetics with and without diabetic retinopathy [J]. *Sci Rep*, 2023, 13 (1) : 17115. DOI: 10.1038/s41598-023-43838-9.
- [11] 张红, 赵跃华, 刁晓梅, 等. 视网膜脱离时间对球后血管血流动力学的影响 [J]. *中国急救复苏与灾害医学杂志*, 2018, 13 (12) : 1197-1199. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6966.2018.12.010.
- [12] URS R, KETTERLING JA, SILVERMAN RH. Ultrafast ultrasound imaging of ocular anatomy and blood flow [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2016, 57 (8) : 3810-3816. DOI: 10.1167/iovs.16-19538.
- [13] VOSBORG F, MALMQVIST L, HAMANN S. Non-invasive measurement techniques for quantitative assessment of optic nerve head blood flow [J]. *Eur J Ophthalmol*, 2020, 30 (2) : 235-244. DOI: 10.1177/1120672119858891.
- [14] BANOU L, DASTIRIDOU A, GIANNOUKAS A, et al. The role of color Doppler imaging in the diagnosis of glaucoma: a review of the literature [J]. *Diagnostics*, 2023, 13 (4) : 588. DOI: 10.3390/diagnostics13040588.
- [15] HARRIS A, GUIDOBONI G, SIESKY B, et al. Ocular blood flow as a clinical observation: value, limitations and data analysis [J]. *Prog Retin Eye Res*, 2020: 100841. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2020.100841.
- [16] MARAM J, SRINIVAS S, SADDI SR. Evaluating ocular blood flow [J]. *Indian J Ophthalmol*, 2017, 65 (5) : 337-346. DOI: 10.4103/ijoo.IJO_330_17.
- [17] BOEHM AG, HELMKE K, BERRY CC, et al. Comparison of two transducers for color Doppler imaging of the retrobulbar vessels [J]. *J Glaucoma*, 2002, 11 (2) : 148-153. DOI: 10.1097/00061198-200204000-00011.
- [18] DELLAFFIORE C, LAVA M, VERTICCHIO VERCELLIN AC, et al. Reproducibility of retrobulbar blood flow velocity measurements in normal subjects using two different CDI devices [J]. *La Radiol Med*, 2015, 120 (8) : 737-744. DOI: 10.1007/s11547-015-0522-4.
- [19] VERTICCHIO ALICE C, CUTOLO CA, DELLAFFIORE C, et al. Inter-device reproducibility of retrobulbar blood flow velocity measurements in healthy subjects using color Doppler imaging [J]. *J Ultrasound*, 2016, 19 (2) : 125-130. DOI: 10.1007/s40477-016-0194-5.
- [20] MODRZEJEWSKA M. Guidelines for ultrasound examination in ophthalmology. Part III: color Doppler ultrasonography [J]. *J Ultrasound*, 2019, 19 (77) : 128-136. DOI: 10.15557/JoU.2019.0019.
- [21] BLAND JM, ALTMAN DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement [J]. *Lancet*, 1986, 1 (8476) : 307-310.
- [22] ABEGÃO PINTO L, WILLEKENS K, VAN KEER K, et al. Ocular blood flow in glaucoma--The Leuven Eye Study [J]. *Acta Ophthalmol*, 2016, 94 (6) : 592-598. DOI: 10.1111/aos.12962.

(编辑 王又冬)