

# 波前像差仪在眼科的应用进展

王梅洁, 廖萱, 兰长骏

(1. 川北医学院附属医院眼科, 2. 川北医学院眼视光学系, 四川 南充 637000)

**【摘要】** 人眼波前像差测量技术的研究已经有一个多世纪的历史。随着科技和医学的不断进步, 人眼波前像差测量技术已经能提供客观、实时、准确的测量结果, 近年来被广泛应用于眼科临床视觉质量的评估、屈光手术设计、人工晶状体个体化选择以及一些眼部疾病的诊治等。目前应用于临床的波前像差仪的种类繁多, 其设计原理主要包括 Hartmann-Shack 原理、Tscherning 原理、光路追迹 (Ray-tracing) 原理、视网膜检影镜双程技术原理等。本文将对波前像差仪的历史、分类、测量原理以及在眼科临床工作中的应用进展进行综述。

**【关键词】** 波前像差; 测量技术; 波前像差仪; 眼科

**【中图分类号】** R770.42 **【文献标志码】** A

## Application and development of wavefront aberration in ophthalmology

WANG Mei-jie, LIAO Xuan, LAN Chang-jun

(1. Department of Ophthalmology, Affiliated Hospital of North Sichuan Medical College; 2. Department of Ophthalmology & Optometry, North Sichuan Medical College, Nanchong 637000, Sichuan, China)

**【Abstract】** The research on wavefront aberration measurement techniques has experienced more than a century. With the continuous progress of techniques and medicine, wavefront aberration measurement techniques are widely used in the evaluation of visual quality, refractive surgery design, the individual selection of intraocular lens and the diagnosis and treatment of some eye diseases in clinic due to objective, real-time and accurate measurement results. There are various types of aberrometers, which are mainly based on Hartmann-Shack, Tscherning, Ray-tracing and retinal ophthalmoscope two-way technology principle. This paper briefly reviewed introduced the development history, classification, measurement principles and applications of aberrometers in ophthalmology.

**【Key words】** Wavefront aberration; Measurement techniques; Aberrometer; Ophthalmology

波前像差 (wavefront aberration) 是指物体经光学系统成像的实际波阵面与理想波阵面之间的光程差, 主要包括低阶像差 (83% ~ 95%) 和高阶像差 (5% ~ 17%)<sup>[1]</sup>。高阶像差主要来源于角膜和晶状体, 其中角膜像差占人眼总像差的 80%, 是影响视网膜成像的最主要的因素<sup>[2]</sup>。波前像差测量技术不断的进步和发展, 对了解人眼的光学特性、成像能力和矫正高阶像差具有重要的意义, 本文将对波前像差仪的历史、分类、测量原理以及在眼科临床工作中的应用进展进行综述。

### 1 波前像差仪的历史和分类

对波前像差仪的探索已有数百年历史。1619 年, Scheiner 使用双孔盘对人眼的基本屈光状态进行定性检查; 1900 年, Hartmann 首次使用 Hartmann 屏进行光学测量; 1961 年, Smirnov 等改装了双孔盘, 首次借助物理光学和应用数学的知识, 实现了波

前像差的测量, 形成最早的 Scheiner-Smirnov 主观测量技术<sup>[3]</sup>; 1971 年, Shack 利用透镜阵列代替 Hartmann 屏, 通过测量视网膜出射光线的每一点与相应透镜光轴的偏差推算出像差波面的斜率, 用像差图的形式呈现计算结果, Hartmann-Shack 波前测量装置因此问世; 1994 年 Liang 等<sup>[4]</sup>首次使用 Hartmann-Shack 波前传感器和计算机结合对人眼像差进行定量检查, 发明了第一台 Hartmann-Shack 原理的波前像差仪; 1998 年 He 等<sup>[5]</sup>结合 Smirnov 和 Hartmann-Shack 原理设计出可以测量人眼在调节状态下的波前像差的主观法像差仪。随着像差测量技术不断提高与发展, 波前像差仪的种类更为丰富, 可分为客观法和主观法两大类, 客观测量方法根据不同设计原理主要包括以 Hartmann-Shack 原理为基础的像差仪、以 Tscherning 原理为基础的视网膜型像差仪、以光路追迹 (Ray-tracing) 原理为基础的视网膜型像差仪和以视网膜检影镜双程技术为原理像差仪等。主

基金项目: 四川省卫计委重点课题 (18ZD022)

作者简介: 王梅洁 (1992 - ), 女, 硕士。E-mail: 2410839713@qq.com

通讯作者: 兰长骏。E-mail: eyelanchangjun@163.com

观测量方法即心理物理学检查方法,因其测量耗时,采样密度较低未广泛应用。

## 2 波前像差仪的测量原理

### 2.1 Hartman-Shack 原理

基于 Hartman-Shack 原理的像差仪是一种客观的出射型波前像差仪,如 WASCA、Topcon KR-1W、Zymave 波前像差仪等,是利用微型透镜阵列将视网膜反射光线的波前分为多个单独细小的波前,测量每个波前所聚焦成光点与透镜组光轴之间的偏移来得出人眼波前像差<sup>[6]</sup>。

### 2.2 Tscherning 原理

基于 Tscherning 原理的像差仪是一种客观的入射型视网膜成像像差仪,如 Allegretto、Wavelight 波前像差仪等,是将入射光线在进入人眼之前,划分成许多平行的细光束,计算分析这些细光束在视网膜上的投射光线与理想状态下的偏移,从而得出实际人眼波前像差的大小<sup>[7-8]</sup>。

### 2.3 光路追迹(Ray-tracing)原理

基于光路追迹原理的像差仪是一种客观的入射型视网膜成像像差仪,如 iTrace 屈光分析仪等,是将多个入射光束依照特定的顺序逐个投射到视网膜上,连接计算机的高敏感度 CCD 相机采集视网膜上的图像,分析到达视网膜上光线发生的偏移,通过比较视网膜图像上每个点的实际成像点和理想成像点之间的差距,从而推算出波前像差<sup>[9-10]</sup>,测量入射光瞳中的一束光,而不是同时测量所有的光,这一特性对一些较大像差值的测量更为准确。

### 2.4 视网膜检影镜双程技术原理

基于视网膜检影镜双程技术原理的像差仪是一种客观出射型像差仪,如 OPD-Scan III 波前像差仪,是通过光接收器扫描从视网膜反射回来的光束,根据接收到的时间差,计算出人眼的波前像差<sup>[11]</sup>。

## 3 波前像差仪的眼科临床中应用

由于角膜和晶状体表面曲率的差异、屈光介质的不均匀,人眼波前像差的存在不可避免,是影响视网膜成像的主要原因<sup>[2]</sup>。目前波前像差仪作为一种定量人眼视觉异常的工具已被广泛接受。随着科技的发展,波前像差测量技术与其他技术如自动验光、角膜地形图、生物测量技术或光学相干断层扫描技术的结合使测量的光学质量指标和图像质量指标量化,分离出角膜、晶状体和全眼的像差<sup>[12]</sup>,在正常人眼像差的分布、眼病治疗前后的视觉质量评估、各种人工晶状体视觉质量的评价方面有着广泛应用。

### 3.1 波前像差仪在角膜屈光手术方面的应用

从 1983 年 Trokel 等<sup>[11]</sup>首次开展准分子激光角膜切削术(photorefractive keratectomy, PRK)矫正屈光不正以来,角膜屈光手术方式逐步由准分子激光原位角膜磨镶术(laser in situ keratomileusis, LASIK)、准分子激光上皮瓣下角膜磨镶术(laser epithelial keratomileusis, LASEK)发展到经上皮全准分子激光角膜切削术(trans-epithelial photorefractive keratectomy, TPRK)、飞秒 LASIK 以及飞秒激光小切口角膜基质内透镜取出术(small incision lenticule extraction, SMILE)。传统的角膜屈光手术在矫正屈光不正的同时会增加波前像差和降低对比敏感度,导致患者术后出现眩光、光晕和单眼复视等视觉干扰<sup>[12-13]</sup>。根据术前获取的患者角膜像差(主要是球差)值来设定个性化的角膜切削模式,在波前像差引导和波前优化下进行手术,避免术后角膜球差的增加,术后视觉质量明显提升<sup>[14]</sup>。虹膜识别定位技术结合波前像差引导应用于角膜屈光手术,能更准确进行术中定位,避免由于体位的变化而引起眼球旋转,更极大地提高了手术精确性<sup>[15]</sup>。

由于正常人群的角膜呈中央陡峭周边平坦的非球面形态(负 Q 值),对角膜球差有一定补偿作用,传统角膜屈光手术改变角膜形态使得 Q 值变为正值,导致角膜球差增加。利用目标 Q 值引导下的角膜切削,在矫正屈光不正的同时也维持了角膜前表面的非球性,降低了全眼球差,与传统的角膜屈光术式相比,患者术后视觉质量和术后满意度都获得进一步地提高<sup>[16]</sup>。

研究表明,在角膜屈光手术中,视轴与瞳孔之间的夹角 Kappa 角大于 5°,术中会出现偏中心切削,术后产生眩光、夜间视力和对比敏感度下降等症状<sup>[17]</sup>。目前已有波前像差仪如 iTrace 可以同时进行波前像差和 Kappa 角的测量,并进行角膜屈光手术术前规划;对于较大 Kappa 角,通过瞳孔定位和 Kappa 角的补偿,将患眼的切削中心偏向视轴,可以有效地减少角膜像差。

### 3.2 波前像差仪在白内障手术方面的应用

目前白内障手术已经从传统的复明性手术转变为屈光性手术,人工晶状体(intraocular lens, IOL)的选择尤为重要。球差是唯一具有旋转对称特性的像差,可以通过同样具有旋转对称特性的非球面 IOL 来矫正。全眼球差主要由角膜和晶状体球差组成,并且随着不同的年龄阶段而变化,而像差仪能够进行快捷、准确地测量。大量研究表明<sup>[18-19]</sup>,根据白内障患者角膜、眼内以及全眼波前像差,个体化地选择非球面 IOL,有效地补偿角膜球差,术后可以获得更好的视觉质量。

据统计,我国有 25.4% 的年龄相关性白内障患者术前角膜散光大于 1.50 D,而大于 1.00 D 的散光对术后视觉质量有严重的影响<sup>[20]</sup>。在植入单焦点或多焦点散光矫正型人工晶状体 (Toric IOL) 矫正规则性角膜散光的时候,准确地测量角膜散光度数和进行轴位标记是减少术后残留散光的重要因素。术前可以使用 iTrace 像差仪进行角膜前后表面的散光度数及轴位进行测量,能更准确计算 Toric IOL 度数和指导术前轴位标记。术中可使用像差仪进行实时散光度数测量,准确引导 Toric IOL 的轴位调整。而术后 Toric IOL 的偏心和轴位偏移不仅影响其散光矫正效果,还会增加慧差,导致术后视觉质量下降。轴位每偏移 1° 则会降低 3.3% 的散光矫正效果,如果轴位偏移大于 30°,不但没有矫正散光的作用,反而使散光增加<sup>[21]</sup>,术后复查时可利用 iTrace、OPD-Scan III 等像差仪下进行 Toric IOL 轴位的偏移检查,有助于评估 Toric IOL 的旋转稳定性以及术后效果。

为了满足白内障患者术后能同时看远中近,不同类型的老视矫正型 IOL,如三焦点 IOL、区域折射多焦点 IOL、景深扩展型 IOL 应用于临床,提供了良好的全程视力,提高了患者术后满意度。但老视矫正型 IOL 有其较为严格的适应症。对于 Kappa 角 > 0.50 mm、4 mm 角膜直径下总高阶像差 > 0.30 μm 者不建议植入多焦点 IOL<sup>[22]</sup>;对于超高度近视晶状体囊袋较大、悬韧带不健康、术后囊袋收缩发生率更高,这些因素导致术后 IOL 偏心和倾斜,会增加人眼像差,是其发生眩光、光晕等不良光学现象的主要原因<sup>[23]</sup>,选择多焦点 IOL 应该谨慎。故术前在选择老视矫正型 IOL 时,应对 Kappa 角和角膜高阶像差进行检查,根据检查结果个性化选择手术方式及 IOL 类型。术后进行波前像差检查,可客观地评价术后视觉质量,解释患者的视觉干扰症状,指导治疗方案。

由于白内障术后残留的晶状体上皮细胞增殖、移行和纤维化引起的晶状体后囊混浊 (posterior capsule opacification, PCO) 会导致视力下降,临床上多采用 Nd:YAG 激光行晶状体后囊膜切开术。对于后囊混浊程度较轻的患者,可能出现眩光、暗视力差、视物变色等主观症状,但视力下降不明显,是否需要激光治疗缺乏客观依据。研究发现,白内障术后晶状体后囊混浊的患者,其全眼高阶像差增加等导致患者视觉质量下降<sup>[24]</sup>。因此,视力下降不再是激光治疗 PCO 的唯一依据,应用波前像差技术可以对 PCO 患者视功能评价提供客观依据,对确定激光治疗时机提供指导。

### 3.3 波前像差仪在其他眼科疾病诊治中的应用

圆锥角膜典型特征是角膜基质组织变薄,导致角膜呈陡峭的圆锥状;角膜形态的改变使得像差增大,最常见的是角膜前后表面慧差增加。随着病程的变化,像差增大程度不同,这些显著差异支持使用波前像差仪检测亚临床圆锥角膜,并对其严重程度进行分级<sup>[25-26]</sup>。

角膜接触镜是目前矫正屈光不正的方法之一,主要包括软性接触镜和硬性透气性角膜接触镜 (rigid gas permeable contact lenses, RGP)。由于 RGP 的硬质特性,不容易产生变形,所以广泛应用于矫正角膜散光,并且大大降低了角膜前表面的总像差,提供更优的视觉质量。通过测量和分析戴镜前后人眼波前像差的变化,可以帮助评估 RGP 的佩戴效果,为临床屈光不正矫正提供指导<sup>[27]</sup>。

干眼症是由于各种原因导致泪液质和量或者动力学的异常,影响人们生活质量的常见眼表疾病。研究表明人眼泪膜对像差有着不可忽视的影响,干眼症患者角膜高阶像差显著增加,患者视觉质量和生活质量明显降低<sup>[28]</sup>,可以通过波前像差的测量来对干眼症进行诊断并予以相应的治疗等等。

### 3.4 波前像差仪联合自适应光学技术的临床应用

自 1997 年 Liang 等<sup>[29]</sup>首次采用自适应光学 (adaptive optics, AO) 技术联合波前像差测量矫正人眼低阶和高阶像差获得活体状态下超视力 (supernormal vision) 以来,自适应光学联合像差矫正技术被应用于眼科临床工作中。2002 年 Fernández 等<sup>[30]</sup>将 Hartmann-Shack 原理的波前测量技术和变形反射镜结合,实现波前像差的测量及模拟纠正,进行视觉质量的分析。随后将变形反射镜改进为空间光调制器,可以实时、动态地测量、纠正或者诱导某些像差,进行视觉模拟,该设备的重复性良好并且与其他波前像差测量设备的有较好的一致性<sup>[31]</sup>。该设备应用于角膜屈光手术前对术眼波前像差进行实时动态的矫正或叠加,获得矫正后的视觉质量模拟图,手术医师可根据视觉质量模拟图,设计最佳人眼像差矫正策略,避免降低能提高视觉质量的单项波前像差 (如角膜慧差),使术后获得最优质的视觉效果<sup>[32]</sup>。

研究发现弱视治疗效果与全眼球差和眼内球差有关,因此,对于弱视儿童的检查以及疗效的评估不能再仅仅依靠视力,应该结合波前像差综合分析。整合了波前像差仪的自适应光学治疗仪通过高阶像差的测量和实时像差纠正,使获得高清晰度的视网膜成像,因而能够更好地刺激视网膜感光细胞,促进视觉神经系统的发育,治疗效果优于传统的弱视治

疗仪<sup>[33]</sup>。

自适应光学联合像差测量技术还应用于视网膜成像检查方面。利用扫描激光检眼镜、光学相干层析成像技术和自适应光学系统的结合,建立自适应光学扫描激光检眼镜<sup>[34]</sup>和自适应光学相干断层扫描技术<sup>[35]</sup>,通过波前像差仪对人眼高阶像差的测定和矫正,提供了视网膜微血管的高分辨率图像,能帮助临床医师及早发现眼科疾病如青光眼、糖尿病、高血压等引起的细微眼底病变,予以早期干预和有效治疗。

## 4 小结

波前像差技术通过波前引导和优化治疗使屈光手术得到了革新,也使高阶像差在视觉系统中的重要性得到了关注,成为客观评价视觉质量的最常用的指标之一,但是我们也必须认识到其中的局限及不足之处,由于人眼像差受年龄、泪膜稳定性和人眼调节状态等影响,导致波前像差的测量不准确,视觉质量的评估需要多方面的检查,而不是完全依赖像差仪;另一方面,由于人眼同时存在色散射和衍射,波前像差仪对于眼内光散射等造成的夜间视觉质量问题无法进行定量分析,导致高估患者视物真实成像质量。随着科技的发展,视觉科学和交叉学科地不断发展,波前像差与其他技术的结合,不断地推进视觉质量评估技术,提供更准确、全面和客观的视觉质量评估并有效的矫正相关视觉干扰,为患者提供良好视觉质量。

## 参考文献

[1] Miller JM, Anwaruddin R, Straub J, *et al.* Higher order aberrations in normal, dilated, intraocular lens, and laser in situ keratomileusis corneas[J]. *J Refract Surg*, 2002, 18(5): 579 - 583.

[2] Thibos LN. Wavefront data reporting and terminology[J]. *J Refract Surg*, 2001, 17(5): 578 - 583.

[3] Howland HC. The history and methods of ophthalmic wavefront sensing[J]. *J Refract Surg*, 2000, 16(5): 552 - 553.

[4] Liang J, Grimm B, Goelz S, *et al.* Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor[J]. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 1994, 11(7): 1949 - 1957.

[5] He JC, Marcos S, Webb RH, *et al.* Measurement of the wave-front aberration of the eye by a fast psychophysical procedure[J]. *J Opt Soc Am Opt Image Sci Vis*, 1998, 15(9): 2449 - 2456.

[6] Thibos LN. Principles of Hartmann-Shack aberrometry[J]. *J Refract Surg*, 2000, 16(5): 563 - 565.

[7] Mrochen M, Kaemmerer M, Mierdel P, *et al.* Principles of Tscherning aberrometry[J]. *J Refract Surg*, 2000, 16(5): 570 - 571.

[8] Molebny VV, Panagopoulou SI, Molebny SV, *et al.* Principles of ray tracing aberrometry[J]. *J Refract Surg*, 2000, 16(5): 572 - 575.

[9] Garzón N, García-Montero M, López-Artero E, *et al.* Influence of trifocal intraocular lenses on standard autorefractometry and aberrometer-based autorefractometry[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2019, 45(9): 1265 - 1274.

[10] Zhu X, Ye H, He W, *et al.* Objective functional visual outcomes of cataract surgery in patients with good preoperative visual acuity[J]. *Eye (Lond)*, 2017, 31(3): 452 - 459.

[11] Trokel SL, Srinivasan R, Braren B. Excimer laser surgery of the cornea[J]. *Am J Ophthalmol*, 1983, 96(6): 710 - 715.

[12] Bohac M, Koncarevic M, Dukic A, *et al.* Unwanted astigmatism and high-order aberrations one year after excimer and femtosecond corneal surgery[J]. *Optom Vis Sci*, 2018, 95(11): 1064 - 1076.

[13] Wang J, Ren Y, Liang K, *et al.* Changes of corneal high - order aberrations after femtosecond laser-assisted in situ keratomileusis[J]. *Medicine*, 2018, 97(18): 97 - 103.

[14] Shaheen MS, Shalaby BA, Piñero DP, *et al.* Wave front-guided photorefractive keratectomy using a high-resolution aberrometer after corneal collagen cross-linking in keratoconus[J]. *Cornea*, 2016, 35(7): 946 - 953.

[15] 林可劼, 陈军, 林文, 等. 虹膜定位对飞秒联合波前像差引导 LASIK 治疗近视散光的疗效[J]. *国际眼科杂志*, 2016, 16(6): 64 - 67.

[16] Amigó A, Bonaque-González S, Guerras-Valera E. Control of induced spherical aberration in moderate hyperopic LASIK by customizing corneal asphericity[J]. *J Refract Surg*, 2015, 31(12): 802 - 806.

[17] Qi H, Jiang JJ, Jiang YM, *et al.* Kappa angles in different positions in patients with myopia during LASIK[J]. *Int J Ophthalmol*, 2016, 9(4): 585 - 589.

[18] 林佳, 廖莹, 兰长骏, 等. 球面与非球面人工晶状体植入术后视觉质量的对比研究[J]. *山东大学耳鼻喉眼学报*, 2019, 33(4): 109 - 114.

[19] Tan QQ, Lin J, Tian J, *et al.* Objective optical quality in eyes with customized selection of aspheric intraocular lens implantation[J]. *BMC Ophthalmology*, 2019, 19(1): 152.

[20] Yuan X, Song H, Peng G, *et al.* Prevalence of corneal astigmatism in patients before cataract surgery in northern china[J]. *J Ophthalmol*, 2014, 2014: 536412.

[21] Kaur M, Shaikh F, Falera R, *et al.* Optimizing outcomes with toric intraocular lenses. [J]. *Indian J Ophthalmol*, 2017, 65(12): 1301 - 1313.

[22] 中华医学会眼科学分会白内障及人工晶状体学组. 中国多焦点人工晶状体临床应用专家共识(2019年)[J]. *中华眼科杂志*, 2019, 55(7): 491 - 494.

[23] Tchah H, Nam K, Yoo A. Predictive factors for photic phenomena after reflective, rotationally symmetric, multifocal intraocular lens Implantation[J]. *J Ophthalmol*, 2017, 10(2): 241 - 245.

[24] Yotsukura E, Torii H, Saiki M, *et al.* Effect of neodymium:YAG laser capsulotomy on visual function in patients with posterior capsule opacification and good visual acuity[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2016, 42(3): 399 - 404.

[25] Aksoy S, Akkaya S, Ozkurt Y, *et al.* Topography and higher order corneal aberrations of the fellow eye in unilateral keratoconus[J]. *J Ophthalmol*, 2017, 47(5): 249 - 254.

[26] Gordon-Shaag A, Millodot M, Ifrah R, *et al.* Aberrations and topography in normal, keratoconus-suspect, and keratoconic eyes[J].

Optom Vis Sci, 2012, 89(4): 411-418

- [27] Yu Q, Wu JX, Zhang HN, et al. Aberration changes of the corneal anterior surface following discontinued use of rigid gas permeable contact lenses[J]. Int J Ophthalmol, 2013, 6(2): 178-182.
- [28] Benítez-Del-Castillo J, Labetoulle M, Baudouin C, et al. Visual acuity and quality of life in dry eye disease; Proceedings of the OCEAN group meeting[J]. Ocul Surf, 2017, 15(2): 169-178.
- [29] Liang JZ, Williams DR. Aberrations and retinal image quality of the normal human eye [J]. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 1997, 14(11): 2873-2883.
- [30] Fernández EJ, Manzanera S, Piers P, et al. Adaptive optics visual simulator[J]. J Refract Surg, 2002, 18(5): 634-638.
- [31] Otero C, Vilaseca M, Arjona M, et al. Comparison of the Adaptive Optics Vision Analyzer and the KR-1 W for measuring ocular wave

aberrations[J]. Clin Exp Optom, 2017, 100(1): 26-32.

- [32] 李仕明, 熊瑛, 李婧, 等. 利用自适应光学技术对个性化像差矫正的初步探索[J]. 中华眼科杂志, 2009, 45(10): 926-930.
- [33] Liao M, Zhao H, Liu L, et al. Training to improve contrast sensitivity in amblyopia; correction of high-order aberrations[J]. Sci Rep, 2016, 6(1): 35702.
- [34] Zhang Y, Wang X, Blanco ER, et al. Photoreceptor perturbation around subretinal drusenoid deposits revealed by adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy[J]. Am J Ophthalmol, 2014, 158(3): 584-596.
- [35] 陈浩, 黄锦海, 高蓉蓉, 等. 重视自适应光学 OCT 的工程技术研究及转化应用[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志, 2018, 20(11): 641-647.

(收稿日期: 2019-10-07

学术编辑: 邹云春)

(上接第 541 页)

### 参考文献

- [1] 尹红燕, 谢瑞瑾, 马玉龙, 等. 安徽省医共体模式的探索和实践[J]. 中国卫生政策研究, 2017, 10(7): 28-32.
- [2] 周绿林, 许兴龙, 陈羲. 基于医保支付方式改革的医疗服务体系优化研究综述[J]. 中国卫生事业管理, 2015, 32(8): 596-598.
- [3] 林伟龙, 代涛, 朱晓丽. 安徽省天长市县域医联体改革实践分析[J]. 中国卫生经济, 2017, 36(4): 74-77.
- [4] 黄培, 易利华. 3 种不同类型医联体模式的实践与思考[J]. 中国医院管理, 2015, 35(2): 16-19.
- [5] 方鹏骞, 李曼琪, 李文敏. 试论三级公立医院在医疗联合体中的引领作用[J]. 中国医院管理, 2018, 38(5): 1-3.

- [6] 王一琳, 方鹏骞. 关于医疗联合体与“三医联动”关系的思考[J]. 中国医院管理, 2018, 38(5): 4-6.
- [7] 国家卫生计生委. 关于开展医疗联合体建设试点工作的指导意见[EB/OL]. 2016[12-29][2017-11-25].
- [8] 王雪云, 姚峥嵘, 田侃. 基于供给侧视角的我国分级诊疗相关问题思考[J]. 中国医院管理, 2018, 37(3): 20-23.
- [9] 梁涛, 杨立倩, 廖春丽, 等. 新医改“强基层”背景下紧密型医联体的管理模式及其应用效果[J]. 广西医学, 2018, 40(5): 552-555.
- [10] 龙俊睿, 孙自学, 段光锋, 等. 纵向紧密医疗联合体绩效评估指标体系的构建研究[J]. 中国医院管理, 2018, 38(5): 25-27.

(收稿日期: 2020-03-10

学术编辑: 柯雄)