

圆锥角膜眼配戴硬性透气性接触镜后 残余像差对视觉质量的影响*

杨必¹, 李谦¹, 廖孟¹, 刘陇黔^{1△}, 梁波², 戴云², 赵豪欣², 赵军磊², 张雨东²

1. 四川大学华西医院 眼科(成都 610041); 2. 中国科学院光电技术研究所(成都 610041)

【摘要】 目的 分析圆锥角膜眼配戴硬性透气性接触镜(RGPCL)后残余像差对视觉质量的影响。**方法** 选择圆锥角膜患者 20 例,配戴 RGPCL 一个月后,采用自适应光学系统实时动态测量、并闭环矫正 4 mm 瞳孔直径下圆锥角膜 RGPCL 配戴眼的残余像差。测量并计算残余像差矫正前后对比敏感度功能(CSF)值(空间频率 2、4、8、16、32 cpd)。根据残余像差矫正前后的波前像差值,计算调制传递函数(MTF)值(空间频率 2、4、8、16、32 cpd)。计算各个空间频率的 MTF 获益值和 CSF 获益值。**结果** 与残余像差矫正前相比,残余像差矫正后,圆锥角膜 RGPCL 配戴眼在各个空间频率下的 MTF 值均有提高($P<0.001$);在 2、4、8、16 cpd 空间频率下,CSF 值有提高($P<0.05$);在 32 cpd 空间频率下,残余像差矫正前后 CSF 值差异无统计学意义($P>0.05$)。圆锥角膜 RGPCL 配戴眼在低空间频率(2 cpd)和中空间频率(4、8、16 cpd)下,CSF 获益值与矫正前残余总像差的均方根(RMS)值呈正相关(r 值分别为 0.591、0.552、0.711、0.783, $P<0.05$);高空间频率(32 cpd)下,CSF 获益值与矫正前残余总像差 RMS 值无关($P>0.05$)。圆锥角膜 RGPCL 配戴眼在残余像差矫正后,随着空间频率的增加,MTF 获益值逐渐增加,中空间频率 CSF 获益值高于低、高空间频率。**结论** 圆锥角膜患者配戴 RGPCL 后,在 4 mm 瞳孔直径下,残余像差对眼球光学质量及低、中频的空间 CSF 存在影响。

【关键词】 圆锥角膜 硬性透气性接触镜 残余像差 视觉质量

硬性透气性接触镜(rigid gas permeable contact lens, RGPCL)作为屈光不正和异常角膜的一种矫正方式,具备高透氧系数(Dk)值、高弹性模量、亲水、抗沉淀等特性,被广泛应用到临床中^[1]。圆锥角膜作为一种非炎症角膜扩张性疾病,常伴随大量不规则角膜散光和高度屈光不正^[2]。RGPCL 是圆锥角膜眼最常用的光学矫正手段^[3]。然而圆锥角膜眼基础像差较大,配戴 RGPCL 后,尽管矫正视力得到明显提高,其残余像差仍高于正视眼或近视 RGPCL 配戴眼^[4]。

对于圆锥角膜患者而言,配戴 RGPCL 后,残余像差是否会对视功能带来影响?对此,既往研究大都直接采用残余像差与视功能作相关分析^[5-7]。然而单纯采用残余像差与视功能的相关性来评价残余像差对视觉质量的影响并不完善^[7]。且到目前为止,尚未有研究尝试将圆锥角膜 RGPCL 配戴眼的残余像差矫正后再分析其视功能的变化。

近年来,自适应光学技术的快速发展使得人眼像差的实时分析矫正成为了可能。本研究采用中国科学院光电技术研究所自主研发的自适应光学系统实时动态矫正圆锥角膜 RGPCL 配戴眼的残余像差,测量并分别比较圆锥角膜 RGPCL 配戴眼残余像差矫正前后的像差均方根(root mean square, RMS)值、调制传递函数(modulation transfer function, MTF)值、空间对比敏感度功能(contrast sensitivity function, CSF),结合客观和主观观察指标分析残余像差对圆锥角膜 RGPCL 配戴眼的视觉质量是否存在影响。

1 对象和方法

1.1 研究对象

本研究从四川大学华西医院眼科隐形眼镜门诊招募圆锥角膜患者 20 例。纳入标准:临床诊断为圆锥角膜的患者;14~35 岁;性别不限;愿意采用 RGPCL 矫正圆锥角膜;无全身性疾病,眼部无其他器质性病变。最终纳入的 20 例圆锥角膜患者双眼均验配 RGPCL。若为单眼圆锥角膜,选择该眼为研究眼;若为双眼圆锥角膜,采用抛硬币法任选一眼作为研究眼。

20 例圆锥角膜患者平均年龄为(20.40 ± 3.80)岁。采用美国开展的圆锥角膜联合跟踪研究分类标准^[8]对本研究中的圆锥角膜进行分级。20 只研究眼中,轻度圆锥角膜 2 只,中度圆锥角膜 9 只,重度圆锥角膜 9 只。20 只圆锥角膜眼采用 RGPCL 矫正后平均高对比度 LogMAR 视力为 0.04 ± 0.04 。

本研究遵循赫尔辛基宣言,以口头和书面形式向符合条件的研究对象介绍研究详情,研究对象或其监护人均签署知情同意书。四川大学华西医院伦理委员会批准本研究。

1.2 方法

1.2.1 RGPCL 参数及验配方法 本研究中,轻度圆锥角膜眼配戴双非球面设计 RGPCL (Menicon Z; Menicon Co., Ltd., Nagoya, Japan),中度、重度圆锥角膜眼配戴前表面球面设计、后表面多弧设计 RGPCL (Menicon E-1; Menicon Co., Ltd., Nagoya, Japan)。镜片材料由硅氧烷苯乙烯与氟甲基丙烯酸酯聚合而成,镜片 Dk 值为 $163\text{ cm}^2/\text{s (mLO}_2/\text{mL}\cdot\text{mmHg)}\cdot 10^{-11}$,折射率为 1.439,含水量 $\leq 0.5\%$,透光

* 四川省卫生和计划生育委员会科研课题(No. 18PJ084)资助

△ 通信作者, E-mail: b.q15651@hotmail.com

率 $\geq 90\%$ 。所有患者均采用试戴法进行 RGPCL 验配,通过荧光素染色评估,实现三点接触配适。选择合适的基弧后,进行片上验光,确定最终镜片度数。

1.2.2 自适应光学系统和 CSF 测试 本研究所用的自适应光学系统由合作单位“中国科学院成都光电技术研究所自适应光学重点研究实验室”研制,该系统具有良好的准确性和可重复性^[9]。

CSF 检测的刺激视标通过微型显示器呈现,试验刺激采用心理物理学工具包 Psych Tool Box 在 Matlab6.5 软件(Mathworks, Natick, MA)上编写,并通过特殊视频处理电路^[10]达到 14 位的灰阶显示。视觉刺激呈现的模式与 ZHOU 等^[11]的研究一致。圆锥角膜眼配戴 RGPCL 一个月完全适应后,进行后续残余像差矫正和 CSF 检测,CSF 检测流程与笔者前期研究^[1]一致。

采用自适应光学系统实时动态闭环矫正圆锥角膜 RGPCL 配戴眼的残余像差。分别测量残余像差矫正前后的对比度阈值(空间频率 2、4、8、16、32 cpd),计算各空间频率的 CSF 值,并绘出 CSF 曲线。

1.2.3 数据分析 根据美国光学学会标准^[12],采用 Zernike 多项式对波前像差进行描述。记录 4 mm 瞳孔直径下,人眼像差测量系统提供的 7 阶 35 项像差 Zernike 系数值,分别计算残余总像差 RMS 值、总低阶像差 RMS 值、总高阶像差 RMS 值。根据光学系统的傅里叶变换特性,计算 MTF。

以残余像差矫正后的 MTF(CSF)值与残余像差矫正前的 MTF(CSF)值的比值分别作为各个空间频率下的调制传递函数获益值(MTF visual benefit)和对比敏感度获益值(CSF visual benefit)。

1.2.4 统计学方法 采用自身前后对照法,对圆锥角膜 RGPCL 配戴眼残余像差矫正前后的总像差 RMS 值、总低阶像差 RMS 值、总高阶像差 RMS 值,各空间频率下的 MTF 值、CSF 值进行配对 t 检验,比较残余像差矫正前后圆锥角膜 RGPCL 配戴眼的像差 RMS 值、MTF 和 CSF 差异。对各个空间频率下的 CSF 获益值和矫正前残余总像差 RMS 值进行 Pearson 相关分析。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 圆锥角膜 RGPCL 配戴眼残余像差矫正前后的像差 RMS 值

残余像差矫正前,总像差 RMS(0.329 ± 0.125) μm ,总低阶像差 RMS (0.272 ± 0.136) μm ,总高阶像差 RMS (0.167 ± 0.055) μm 。残余像差矫正后,总像差 RMS (0.086 ± 0.064) μm ,总低阶像差 RMS(0.064 ± 0.068) μm ,总高阶像差 RMS(0.053 ± 0.036) μm 。残余像差矫正前后,总像差 RMS、总低阶像差 RMS、总高阶像差 RMS 差异均有统计学意义($P<0.001$)。

2.2 圆锥角膜 RGPCL 配戴眼残余像差矫正前后 MTF 值

圆锥角膜 RGPCL 配戴眼残余像差矫正前后,各空间频率下的 MTF 值见表 1。残余像差矫正后,各空间频率 MTF 值均高于矫正前,差异有统计学意义($P<0.001$)。

2.3 圆锥角膜 RGPCL 配戴眼残余像差矫正前后的 CSF 值

圆锥角膜 RGPCL 配戴眼残余像差矫正前后,各个空间频率 CSF 值见表 2。在 2、4、8、16 cpd 空间频率下,残余像差矫正后 CSF 值均高于矫正前,差异有统计学意义($P<0.05$);在 32 cpd 空间频率下,CSF 值矫正前后的差异无统计学意义($P>0.05$)。

表 1 圆锥角膜 RGPCL 眼残余像差矫正前后 MTF 值

时点	空间频率/cpd				
	2	4	8	16	32
残余像差矫正前	0.958 $\pm$ 0.013	0.770 $\pm$ 0.099	0.381 $\pm$ 0.169	0.155 $\pm$ 0.102	0.075 $\pm$ 0.142
残余像差矫正后	0.980 $\pm$ 0.005*	0.925 $\pm$ 0.036*	0.802 $\pm$ 0.109*	0.601 $\pm$ 0.152*	0.351 $\pm$ 0.051*

* $P<0.001$,与残余像差矫正前比较

表 2 圆锥角膜 RGPCL 眼残余像差矫正前后 CSF 值

时点	空间频率/cpd				
	2	4	8	16	32
残余像差矫正前	7.695 $\pm$ 2.675	7.568 $\pm$ 2.650	4.441 $\pm$ 1.981	2.172 $\pm$ 0.652	1.506 $\pm$ 0.173
残余像差矫正后	8.512 $\pm$ 2.400*	9.624 $\pm$ 2.934*	6.312 $\pm$ 3.114*	2.545 $\pm$ 1.081*	1.534 $\pm$ 0.226

* $P<0.05$,与残余像差矫正前比较

2.4 圆锥角膜 RGPCL 配戴眼 CSF 获益值与矫正前残余总像差 RMS 值的相关性

结果见图 1。在低空间频率(2 cpd)和中空间频率(4、8、16 cpd)下,CSF 获益值与矫正前残余总像差 RMS 值呈正相关(r 值分别为 0.591、0.552、0.711、0.783, $P<0.05$),随着矫正前残余总像差的增加,残余像差矫正后 CSF 获益值越大。高空间频率(32 cpd)下,CSF 获益值与残余总像差 RMS 值无明显相关性($P>0.05$)。

2.5 圆锥角膜 RGPCL 配戴眼残余像差矫正后的 MTF 及 CSF 获益值

圆锥角膜 RGPCL 配戴眼残余像差矫正后,在 2、4、8、16、32 cpd 空间频率下,MTF 获益值分别为 1.022、1.202、2.107、3.878、4.631,随着空间频率的增加,MTF 获益值逐渐增加。CSF 获益值分别为 1.106、1.272、1.421、1.172、1.018,中空间频率的 CSF 获益值高于低、高空间频率。见图 2。

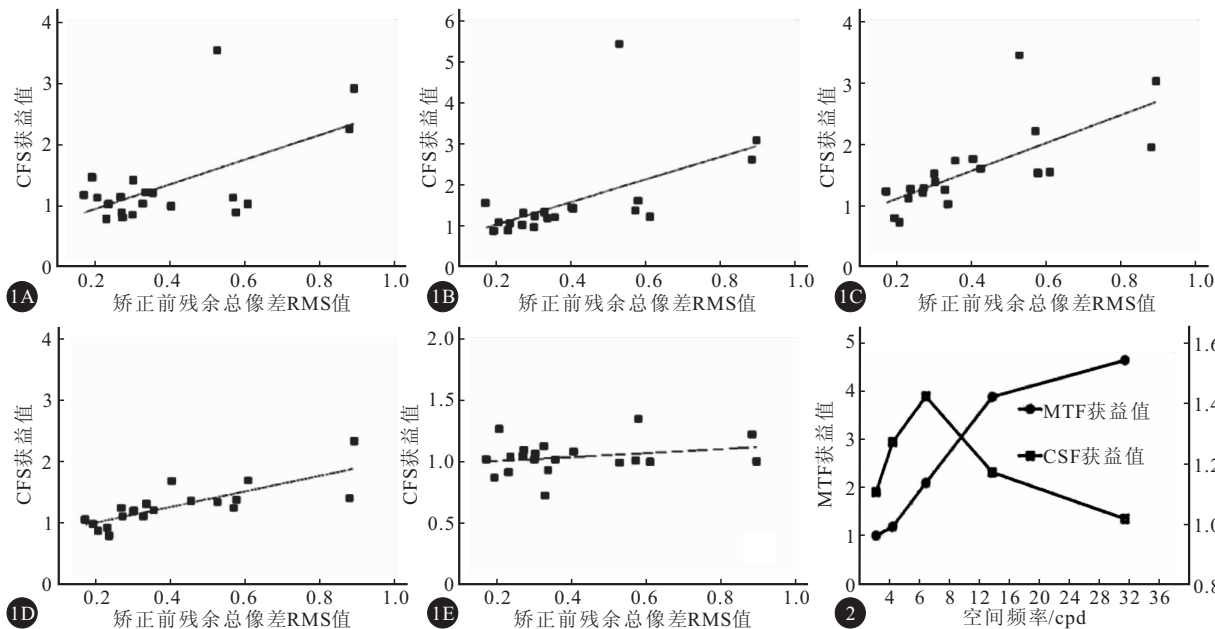


图 1 圆锥角膜 RGPCL 配戴眼残余像差矫正后,各空间频率下 CSF 获益值与矫正前残余总像差的相关性 图 2 圆锥角膜 RGPCL 配戴眼 MTF 和 CSF 获益值对照图

A: 2 cpd; B: 4 cpd; C: 8 cpd; D: 16 cpd; E: 32 cpd

3 讨论

本研究首次采用自适应光学系统矫正圆锥角膜 RGPCL 配戴眼的残余像差,结合视觉质量的客观和主观评价方法,通过比较残余像差矫正前后的波前像差 RMS 值、MTF 和 CSF,分析残余像差对圆锥角膜 RGPCL 配戴眼的视觉质量是否存在影响。

3.1 客观方法评估 RGPCL 配戴眼残余像差对视觉质量的影响

像差 RMS 值是基于几何光学的一种客观评判指标,也是目前最常用的反映像差大小的评价指标。既往研究显示,RGPCL 在矫正配戴眼低阶像差的同时还可以有效降低高阶像差,而这种作用主要是通过减少角膜像差来实现^[13]。谢培英等^[14]研究显示,54 只圆锥角膜眼配戴 RGPCL 后,5.7 mm 瞳孔直径下,总像差 RMS 从 3.63 μm 降至 1.39 μm ,总高阶像差 RMS 从 2.64 μm 降至 0.81 μm 。NEGISHI 等^[6]研究显示,4 mm 瞳孔直径下,13 只圆锥角膜 RGPCL 配戴者残余总高阶像差 RMS 0.538 μm 。CHOI 等^[15]研究显示,14 只圆锥角膜 RGPCL 配戴眼残余总高阶像差 RMS 0.36 μm 。

本研究中,圆锥角膜 RGPCL 眼残余总像差 RMS (0.329 $\pm$ 0.125) μm ,总高阶像差 RMS (0.167 $\pm$ 0.055) μm ,比既往研究低。除瞳孔因素外,另一个重要原因是 RGPCL 设计。NEGISHI 等^[6]研究中圆锥角膜患者配戴球面或双非球面设计 RGPCL,本研究中所有中度、重度圆锥角膜患者均配戴前表面球面、后表面多弧设计的 RGPCL,该设计符合圆锥角膜从中央到周边角膜曲率大幅度变化的特征,尤其适用中度、重度圆锥角膜的矫正,其配适优于普通

球面设计或双非球面设计 RGPCL。此外,这类特殊 RGPCL 矢高比普通球面或双非球面 RGPCL 大,配戴后患者的舒适度可以得到明显提高^[16]。本研究中,20 只圆锥角膜眼配戴 RGPCL 后 LogMAR 矫正视力达到 0.04 $\pm$ 0.04,这一视力水平可以让圆锥角膜患者恢复接近正常的生活。

既往研究显示,MTF 涵盖了像差、散射及衍射各种影响因素,可以更为全面、准确、定量地评价视网膜成像质量^[17]。本研究中,圆锥角膜 RGPCL 配戴眼残余像差矫正后,各个空间频率下 MTF 值均有提升,以中、高频段最为显著。提示圆锥角膜眼配戴 RGPCL 后,在 4 mm 瞳孔直径下,眼球光学质量并不完善,仍有提升空间。

3.2 主观方法评估 RGPCL 配戴眼残余像差对视觉质量的影响

CSF 作为一种心理物理学测量方法,可以从主观上评价人眼的视觉质量。它是眼球纯光学系统的敏感度和视网膜神经增效系统的总和,是一项能全面反映视觉功能的心理物理学检查方法^[1]。

圆锥角膜 RGPCL 配戴眼残余像差矫正后,CSF 在低、中空间频率下均有提高,差异有统计学意义,而高频段差异无统计学意义。此外,圆锥角膜 RGPCL 配戴眼矫正前残余像差越大,中、低频的 CSF 视觉获益越大。这一结果与既往采用自适应光学系统研究空间对比敏感度获益程度的结论一致,即 CSF 在高空间频率下更易受神经因素而非光学因素的影响^[18-19]。该结果说明圆锥角膜 RGPCL 配戴眼矫正前残余像差对低、中频的空间对比敏感度有影响,为更好地提升圆锥角膜眼的视觉质量,未来将进一步分析残余像差中不同组成成分对视觉质量的影响,为更好地矫正圆锥角膜提供依据。

3.3 客观与主观评估指标一致性的分析

残余像差矫正后,随着空间频率的增加,圆锥角膜 RGPCL 配戴眼的 MTF 获益值逐渐增大,而 CSF 获益值的变化却未呈现相同规律性,CSF 最大获益值出现在中频段。这一结果与笔者前期研究结论^[1]相符。YOON 等^[20]采用自适应光学系统矫正人眼像差后,也发现 CSF 获益在中频段最显著。这是因为 CSF 涵盖了视网膜图像信息到视皮层之间的视通路上的加工处理过程。CSF 既包含了眼球纯光学系统的信息,即 MTF,也包含了视网膜及视皮层处理信息的功能,后者被称为神经对比敏感度(neural contrast sensitivity function, Neural CSF);CSF 等于 MTF 与 Neural CSF 的乘积,即 Neural CSF 和 MTF 共同决定 CSF^[21]。

综上,圆锥角膜患者配戴 RGPCL 后,在 4 mm 瞳孔直径下,残余像差对眼球光学质量及低、中频的空间 CSF 存在影响。为更好地提升圆锥角膜眼的视觉质量,未来应进一步分析残余像差中不同组成成分对视觉质量的影响,为更好地矫正圆锥角膜提供依据。

参 考 文 献

- [1] 杨 必, 李 谦, 刘陇黔, 等. 近视眼配戴 RGPCL 后残余像差对视觉质量的影响. 中国实用眼科杂志, 2016, 34 (9): 931-935.
- [2] ROMERO-JIMÉNEZ M, SANTODOMINGO-RUBIDO J, WOLFFSOHN JS, *et al.* Keratoconus: a review. *Cont Lens Anterior Eye*, 2010, 33(4): 157-166.
- [3] 王志听, 谢培英, 唐 琰, 等. 圆锥角膜患者长期配戴透气性硬性角膜接触镜对眼表的影响. 眼科, 2008, 17(5): 313-315.
- [4] KOSAKI R, MEADA N, BESSHO K, *et al.* Magnitude and orientation of Zernike terms in patients with keratoconus. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2007, 48(7): 3062-3068.
- [5] MARSACK JD, PARKER KE, PESUDOVSKY K, *et al.* Uncorrected wavefront error and visual performance during RGP wear in keratoconus. *Optom Vis Sci*, 2007, 84(6): 463-470.
- [6] NEGISHI K, KUMANOMIDO T, UTSUMI Y, *et al.* Effect of higher order aberrations on visual function in keratoconic eyes with a rigid gas permeable contact lens. *Am J Ophthalmol*, 2007, 144(6): 924-929.
- [7] ROCHA KM, VABRE L, HARMS F, *et al.* Effects of Zernike wavefront aberrations on visual acuity measured using electromagnetic adaptive optics technology. *J Refract Surg*, 2007, 23(9): 953-959.
- [8] ZADNIK K, BARR JT, EDRINGTON TB, *et al.* Baseline findings in the Collaborative Longitudinal Evaluation of Keratoconus (CLEK) Study. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 1998, 39(13): 2537-2546.
- [9] LI S, XIONG Y, LI J, *et al.* Effects of monochromatic aberration on visual acuity using adaptive optics. *Optom Vis Sci*, 2009, 86(7): 868-874.
- [10] LI X, LU ZL, XU P, *et al.* Generating high gray-level resolution monochrome displays with conventional computer graphics cards and color monitors. *J Neurosci Methods*, 2003, 130(1): 9-18.
- [11] ZHOU J, ZHANG Y, DAI Y, *et al.* The eye limits the brain's learning potential. *Sci Rep*, 2012, 2: 364 [2017-07-01]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3326633/>. doi: 10.1038/srep00364.
- [12] THIBOS LN, APPLEGATE RA, SCHWIEGERLING JT, *et al.* Standards for reporting the optical aberrations of eyes. *J Refract Surg*, 2002, 18(5): 652-660.
- [13] LU F, MAO X, QU J, *et al.* Monochromatic wavefront aberrations in the human eye with contact lenses. *Optom Vis Sci*, 2003, 80(2): 135-141.
- [14] 谢培英, 王 丹, 杨丽娜, 等. 透气性硬性接触镜矫正圆锥角膜的视觉质量评价. 中华眼科杂志, 2005, 41(12): 1086-1090.
- [15] CHOI J, WEE WR, LEE JH, *et al.* Changes of ocular higher order aberrations in on-and off-eye of rigid gas permeable contact lenses. *Optom Vis Sci*, 2007, 84(1): 52-51.
- [16] HWANG JS, LEE JH, WEE WR, *et al.* Effects of multicurve RGP contact lens use on topographic changes in keratoconus. *Korean J Ophthalmol*, 2010, 24(4): 201-206.
- [17] COX MJ, ATCHISON DA, SCOTT DH, *et al.* Scatter and its implications for the measurement of optical image quality in human eyes. *Optom Vis Sci*, 2003, 80(1): 58-68.
- [18] DE GRACIA P, MARCOS S, MATHUR A, *et al.* Contrast sensitivity benefit of adaptive optics correction of ocular aberrations. *J Vis*, 2011, 11(12): 1-10.
- [19] LIANG B, LIU R, DAI Y, *et al.* Effects of ocular aberrations on contrast detection in noise. *J Vis*, 2012, 12(8): pii: 3. doi: 10.1167/12.8.3.
- [20] YOON GY, WILLIAMS DR. Visual performance after correcting the monochromatic and chromatic aberrations of the eye. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 2002, 19(2): 266-275.
- [21] LIU R, ZHOU J, ZHAO H, *et al.* Immature visual neural system in children reflected by contrast sensitivity with adaptive optics correction. *Sci Rep*, 2014, 4: 4687. doi: 10.1038/srep04687.

(2018-01-04 收稿, 2018-03-05 修回)

编辑 余 琳