

角膜塑形术后角膜面形分析及周边离焦研究

刘宝凯 刘永基 谢培英 郭曦 谷健达 于浩

Analysis of the corneal surface and peripheral defocus after orthokeratology

LIU Bao-kai, LIU Yong-ji, XIE Pei-ying, GUO Xi, GU Jian-da, YU Hao

引用本文:

刘宝凯, 刘永基, 谢培英, 郭曦, 谷健达, 于浩. 角膜塑形术后角膜面形分析及周边离焦研究[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 770–777. doi: 10.37188/CO.2019–0248

LIU Bao-kai, LIU Yong-ji, XIE Pei-ying, GUO Xi, GU Jian-da, YU Hao. Analysis of the corneal surface and peripheral defocus after orthokeratology[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 770–777. doi: 10.37188/CO.2019-0248

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2019–0248>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

离焦对激光通信接收视场的影响分析

Analysis of the influence of defocus on the field of view of laser communication reception

中国光学. 2018, 11(5): 822 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0822>

长条形镜面面形拟合技术研究

Surface fitting technology of rectangular mirror

中国光学. 2018, 11(6): 1011 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.1011>

低阶梯多级微反射镜高度误差分析及制作研究

Error analysis and fabrication of low-stepped mirrors

中国光学. 2019, 12(4): 791 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0791>

采用五棱镜扫描法检测大口径平面镜的面形

Surface shape measurement of large flat mirrors using a scanning pentaprism method

中国光学. 2019, 12(4): 920 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0920>

基于光谱指数的蜜橘成熟度评价模型研究

Maturity evaluation model of tangerine based on spectral index

中国光学. 2018, 11(1): 83 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0083>

仿生复眼系统的子眼安装孔对准误差检测方法

Alignment error detection method of sub-eye mounting hole for bionic compound eye system

中国光学. 2019, 12(4): 880 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0880>

角膜塑形术后角膜面形分析及周边离焦研究

刘宝凯^{1,2}, 刘永基^{1,2*}, 谢培英³, 郭曦³, 谷健达^{1,2}, 于浩^{1,2}

(1. 南开大学 电子信息与光学工程学院 现代光学研究所, 天津 300350;

2. 天津市微尺度光学信息技术科学重点实验室, 天津 300350;

3. 北京大学眼视光学研究中心, 北京 100027)

摘要:本文提出了一种新的角膜面形分析方法, 不仅消除了角膜本体厚度对塑形后角膜面形分析的影响, 同时也能体现塑形后角膜的不对称性。在角膜前表面高度数据分析中引入基准参考面, 以消除角膜本体厚度的影响, 进而将塑形后的角膜前表面划分为光学区、转换区和边缘区。分析表明, 角膜塑形后的光学区口径为 (1.9 ± 0.27) mm, 曲率半径为 (8.32 ± 0.38) mm; 转换区口径为 (6.56 ± 0.38) mm, 曲率半径为 (7.48 ± 0.55) mm; 边缘区的曲率半径为 (10.49 ± 1.83) mm。角膜塑形后的转换区水平方向屈光能力小于垂直方向的屈光能力, 鼻侧屈光能力大于颞侧屈光能力, 上侧屈光能力大于下侧屈光能力。利用所得参数建立半定制化的眼模型, 对眼模型进行分析, 结果表明: 角膜塑形后周边呈近视性离焦, 各方向的离焦呈非对称性分布, 符合临床表现。

关键词:角膜塑形镜; 角膜分区; 周边离焦; 分区算法; 眼模型

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2019-0248

Analysis of the corneal surface and peripheral defocus after orthokeratology

LIU Bao-kai^{1,2}, LIU Yong-ji^{1,2*}, XIE Pei-ying³, GUO Xi³, GU Jian-da^{1,2}, YU Hao^{1,2}

(1. College of Electronic Information and Optical Engineering, Institute of Modern Optics,

Nankai University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Micro-scale Optical Information Science and Technology, Tianjin 300350, China;

3. Peking University, Optometry & Ophthalmology Center, Beijing 100027, China)

* Corresponding author, E-mail: yjliu@nankai.edu.cn

Abstract: A new method of corneal shape analysis method is proposed. It not only eliminates the influence of corneal thickness on the shape of cornea after orthokeratology, but also reflects the asymmetry of a cornea. A reference surface is introduced into the analysis of the height data of the anterior surface of the cornea to

收稿日期: 2019-12-24; 修订日期: 2020-01-21

基金项目: 天津市自然科学基金面上项目 (No. 19JCYBJC16800); 南开大学中央高校基本科研业务费专项资金资助 (No. 63191105)

Supported by Natural Science Foundation of Tianjin (No. 19JCYBJC16800); Fundamental Research Funds for the Central Universities, Nankai University (No. 63191105)

eliminate the influence of corneal thickness. On the basis of above, anterior surface of the cornea is divided into the optical zone, transition zone and peripheral zone. The results show that the optical zone diameter is (1.9 ± 0.27) mm, and the curvature radius is (8.32 ± 0.38) mm; the transition zone diameter is (6.56 ± 0.38) mm, and the curvature radius is (7.48 ± 0.55) mm; the curvature radius of the peripheral zone is (10.49 ± 1.83) mm. After orthokeratology, the horizontal refraction of the transition zone is lower than its vertical refraction. The refraction of the nasal side is greater than that of the temporal side and the refraction of the upper side is greater than that of the lower side. A semi-customized eye model is established based on the obtained parameters and the results show that its peripheral defocus is myopic after orthokeratology and its defocus is asymmetrical in each direction, which is consistent with clinical observations.

Key words: orthokeratology lens; division of cornea; peripheral defocus; partition algorithm; eye model

1 引言

角膜塑形镜 (Orthokeratology lens, Ortho-K), 通过改变角膜前表面的形态来改变人眼的屈光度, 其可以在矫正视力的同时, 实现对近视进展的控制^[1-4]。当前全球范围内, 近视呈高发态势^[5-6]。角膜塑形镜由于可以控制近视进展而引起了广泛的关注和研究。

目前已明确, 角膜塑形镜只会改变角膜前表面面形, 不会使角膜的后表面和前房深度发生改变^[7-8]。研究表明, 角膜塑形镜是通过改变角膜形态来改变人眼周边视场的离焦, 进而实现对近视进展的控制^[9]。Swarbrik^[10]等人研究表明, 佩戴角膜塑形镜后, 角膜中心的上皮细胞变薄, 为 (9.3 ± 5.3) μm , 而近中央部分角膜的基质层变厚, 为 (14.4 ± 5) μm 。他们指出, 正是角膜高度的改变引起了角膜屈光力的改变。吕帆课题组采用光学相干层析技术^[11]对水平和垂直两个方向上的角膜高度变化进行了研究, 进一步证实了 Swarbrik 的研究结果, 并发现角膜水平和垂直方向间的改变存在差异。后续其他研究工作也给出了类似的结论。这表明佩戴角膜塑形镜后, 虽然角膜厚度变化不过在几微米到十几微米之间, 但是它对角膜屈光能力的改变却十分显著。

角膜地形图数据是定量分析佩戴角膜塑形镜后角膜面形变化的重要手段。常用的对于佩戴角膜塑形镜的人眼角膜的分析方法是将其分为3个区域: 用于矫正近视的光学区; 具有控制近视

进展功能的转换区和起定位作用的边缘区。Faria-Ribeiro^[12]等人采用对角膜地形图高度数据拟合的方式, 将塑形后的角膜分成了3个区域。Lu等人^[13]采用将角膜高度数据转化为角膜正切屈光力的方式, 根据塑形前后屈光力的不同将角膜分为了3个区域。上述研究的共同特点在于, 直接或者间接采用角膜的高度数据进行计算, 从而得到3个分区。但是, 对口径为6~8 mm的角膜高度数据进行拟合, 相对于450~600 μm 的角膜本体厚度而言, 则很难显示出几个微米或十几个微米角膜厚度变化带来的影响。然而, 这几个微米或十几个微米的角膜厚度变化, 是角膜塑形镜矫正近视和控制近视进展的关键因素。此外, 上述方法将塑形后的角膜视为对称结构, 但实际的临床观测表明, 塑形后的角膜存在不对称性^[14]。

针对以上问题, 本研究提出了一种新的用于分析构建塑形后角膜形貌的方法, 通过设置参考面形, 消除了角膜本体厚度对塑形后角膜面形的影响, 从而更加有效地显示角膜塑形镜对角膜面形的改变。另外, 本方法也进一步证实了角膜塑形后, 各方向的不对称性。在此基础上, 分析了佩戴角膜塑形镜后的人眼角膜面形和周边离焦。该方法为角膜塑形后人眼光学性能的分析提供了一个有力的分析工具。

2 分析塑形后角膜形貌的方法

2.1 塑形后角膜数据的采集

选取采用角膜塑形镜治疗近视的患者共

8 例, 其中女性 6 例, 男性 2 例。本研究选用的均为患者的右眼 (OD)。年龄在 12~16(14.5±2.16) 岁; 有效球镜度数为 -5.00~-0.75(-3.04±1.24) D; 散光度数低于 -1.50 D; 最佳矫正视力 ≥1.0。患者无其他疾病及眼部外伤、手术史。所有患者的角膜高度地形图数据由 Pentacam 眼前节分析仪 (Oculus, 德国) 获得。本研究采集的数据, 均为佩戴角膜塑形镜 3 个月后的数据, 此时, 角膜面形已基本稳定。

2.2 角膜基准面形的确定

本文将角膜地形图数据减去基准面形数据, 以凸显佩戴角膜塑形镜后角膜几个微米到十几个微米范围内面形的变化。在此基础上, 再进一步明确塑形后角膜面形的定量数据, 将角膜分成光学区, 转换区和边缘区 3 个区域。

从角膜高度数据中选取了鼻侧、颞侧、上侧和下侧 4 个方向共计 4 组数据, 分析角膜水平和竖直方向上的变化, 每组采样数据范围为 0~5.5 mm。为了得到每一组数据的角膜基准面形, 将每一组数据分别导入到 1stOpt (First Optimization) 拟合软件中, 通过拟合来确定角膜的基准面形参数, 本文选用的拟合面形是标准的球面, 该面形可表述为:

$$Z = \frac{c(x+y)^2}{1 + \sqrt{1 - c^2(x+y)^2}}, \quad (1)$$

其中, Z , c 分别表示角膜的实际高度和角膜前表面的曲率, x , y 为球面上任一点以光轴为原点的坐标参数, x 代表水平方向上的数据, y 代表竖直方向的数据, 当拟合的数据为水平方向时, 将 y 设为零, 同理, 当拟合的数据是竖直方向时, 将 x 设为零。

2.3 角膜前表面的分区和曲率半径的确定

由于得到了角膜 4 个方向上相应的角膜基准面形参数, 便可计算相应的角膜基准面形相对高度数据。相对高度数据定义为实测数据减去角膜基准面形高度数据。采用此方法, 本文分别计算了鼻侧、颞侧、上侧和下侧 4 个方向的相对高度数据。图 1 给出了颞侧方向上的相对高度数据。图中 OZ 表示光学区 (Optical Zone), TZ 表示转换区 (Transition Zone), PZ 表示边缘区 (Peripheral Zone)。图中横轴正方向代表角膜的颞侧, 纵轴表示相对高度, 正值表示此处角膜高于参考球面高度, 负值表示此处角膜低于参考球面高度。由图 1

可以看出, 颞侧角膜可分为 3 个区域, 一个是相对比较平坦, 且数值接近于零的区域, 表明这个区域内的角膜面形与参考的球面面形十分接近, 即在此区域内, 可以认为角膜面形为球面, 此区对应于矫正视力的光学区。第二个区域, 相对高度数据明显变大, 说明此区域内的角膜面形与参考面形差异大且为正值, 对应于角膜的隆起区域, 此区域对应于控制近视进展的转换区。第三个区域, 则为边缘区, 该区域相对高度较大, 这是由于角膜在边缘处已不是球面。

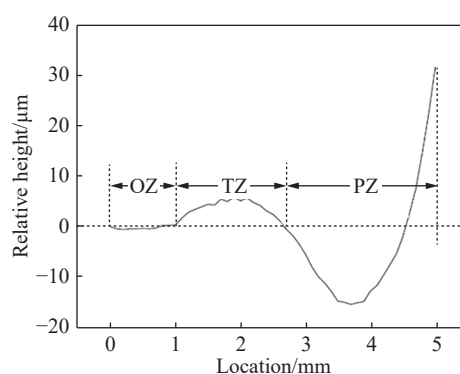


图 1 颞侧方向上不同距离下的相对高度图

Fig. 1 Relative height at different distances in the temporal direction

图 2(彩图见期刊电子版)给出了角膜塑形镜的示意图。塑形镜中央的基弧区对角膜施加向下的压力, 使角膜变平, 形成角膜光学区。基弧区旁边的反转弧区下的角膜变厚, 该区域对应角膜的转换区。周边的定位弧区起支撑作用, 对应边缘区。

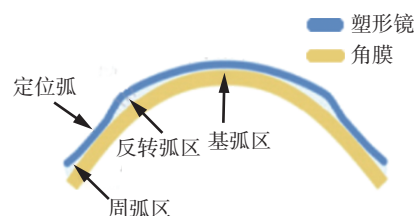


图 2 角膜塑形镜示意图

Fig. 2 Diagram of orthokeratology lens

光学区范围的确定: 从横坐标零点开始, 至纵坐标差值数值斜率突变的地方截止, 这段区间内差值数值均接近于零, 故视为光学区。转换区的范围确定: 以光学区的截止点为起点, 按纵坐标为

零的水平直线与曲线交点位置,确定转换区的两个边界点,进而确定转换区的范围。边缘区的范围确定:以转换区截止点为起点,之后的数据都认为是边缘区。

各个区域的范围确定后,在 Matlab 中,采用最小二乘法拟合出了光学区、转换区和边缘区的曲率半径及其相应的圆心位置。

2.4 经过角膜塑形后人眼光学性能分析

分析角膜面形的改变对人眼周边离焦的影响,在人眼模型上模拟了经角膜塑形后的人眼周边屈光性能。

首先采用 Navarro 的大视场人眼模型作为起点。该眼模型结构简单,却能较为准确地描述人眼的周边像差,因此,成为研究大视场成像性能最常用的人眼模型^[15]。该模型的参数如表 1 所示。在 (ZEMAX ZEMAX-EE 2017 专业版, ZEMAX Development Corporation) 建立相应的面形^[16-19],将前面分析计算得到的 3 个区域的参数,替换 Navarro 的大视场人眼模型的角膜前表面参数,从而建立角膜塑形后半个性化人眼模型。

表 1 Navarro 眼模型结构参数
Tab. 1 Parameters of the Navarro eye model

人眼	位置/mm	半径/mm	折射率	非球面系数
角膜	0	7.72	1.367	-0.26
	0.55	6.5	1.337 4	0
晶状体	3.6	10.2	1.42	-3.131 6
	7.6	-6	1.336	-1
视网膜	24	-12.5	-	-

由于人眼对于 550 nm 的光最为敏感,将波长设为 550 nm,瞳孔直径设为 3 mm 以模拟明视觉情况下的成像。从 ZEMAX 中得到 10°, 20°, 30°和 40°视场下的波前像差数据^[20]。为了与临床数据匹配,将以波数为单位的离焦项 (z_4) 换算成以屈光度为单位的数值。离焦的换算公式为:

$$M = \frac{4\sqrt{3} \times z_4 \times \lambda}{r^2}, \quad (2)$$

式中, M 代表以屈光度为单位表示的离焦, z_4 是

以波数为单位的第 4 项 Zernike 系数, r 为 1.5 mm, λ 为 550 nm。

3 结果与讨论

表 2 给出了角膜的分区范围、曲率半径和圆心坐标的统计数据以及它们的统计平均值,其中,分区拟合的圆心坐标代表了相对瞳孔中心的偏心程度。从表 2 可以看到,光学区、转换区的口径范围分别为 (1.9±0.27) mm 和 (6.56±0.38) mm。利用 Faria-Ribeiro^[12] 方法对本文的患者数据进行分区,得到的光学区口径为 (3.24±0.19) mm,转换区的分区口径为 (6.30±0.15) mm。Lu^[13] 等人根据人眼配戴角膜塑形镜前后角膜屈光力的变化,来确定分区口径,最后确定的分区结果中,光学区的分区口径为 (3.53±0.56) mm,转换区的分区口径为 (6.94±0.25) mm。

表 2 光学区、转换区和边缘区的平均分区口径、各区曲面曲率半径及分区平均圆心坐标

Tab. 2 The average zone diameter, radius of curvature and average center coordinates of the optical zone, the transition zone and the peripheral zone (mm)

	光学区	转换区	边缘区
分区口径	1.90±0.27	6.56±0.38	>6.56
曲率半径	8.32±0.38	7.48±0.55	10.49±1.83
圆心坐标	X_0	0.01±0.05	0.14±0.14
	Y_0	8.38±0.50	7.61±0.46

与 Faria-Ribeiro 和 Lu 的结果相比,本方法得出的光学区口径较小,转换区的口径相当。本方法分区时是以角膜增厚的分界处作为划分标准,而 Faria-Ribeiro 是以各区域的相似度为分区标准, Lu 则是以差异屈光力是否大于零为分区标准,因此本方法的光学区较小。临床研究表明^[14],通过测量角膜屈光力的 5 个位点,包括中央角膜 (0 mm) 处、距离中央半径分别为 1、2、3、4 mm,的位点,记录佩戴前每个位点处的平均屈光力,将配戴角膜塑形镜 3 个月与佩戴前的数据进行对比发现,距离中央环周 1 mm 处的屈光力有所减小,

对应的角膜变薄,从角膜位点 2 mm 处开始,屈光力增大,对应的角膜增厚,至角膜位点 3 mm 处屈光力增大的最多,对应的角膜增厚也最多。本方法的光学平均直径为 1.90 mm,与临床观测的角膜变平区域基本对应。Faria-Ribeiro 等人利用椭球面拟合方法计算出光学区和转换区的曲率半径,分别为(8.44±0.21) mm 和(8.03±0.14) mm,两个区域曲率半径差别不大。Lu 利用多项式拟合方法计算了各区域的曲率半径,分别为(8.04±0.10) mm 和(7.44±0.75) mm,两个区域的曲率半径差异较大。而利用本方法计算的光学区曲率半径为(8.32±0.38) mm,转换区的曲率半径为(7.48±0.55) mm。另外,本文研究表明,各个区域对应的曲面圆心(X_0, Y_0)并不在一条直线上,这表明经由角膜塑形后,各区域相对于瞳孔中心发生了偏心,与 Faria-Ribeiro 等的结论一致。采用本文方法计算出的光学区和转换区的曲率半径差别最大。

表 3 给出了水平方向和竖直方向上角膜的分区范围和曲率半径的统计数据以及它们的统计平均值。可以看出,水平和竖直两个方向上各分区的分区范围差别较小,但是曲率半径却差别较大。这表明,佩戴塑形镜后角膜水平和竖直方向上的屈光力存在差异,而且水平方向各区域的屈光力小于竖直方向各区域的屈光力。Zhong^[14]等通过分析 32 例配戴角膜塑形镜的近视儿童角膜鼻侧、颞侧及下方 3 个轴向上配镜前后角膜曲率的变化情况发现,3 个方向上转换区屈光力均存在很大的不对称性,它们的变化存在差异,并且竖直方向上屈光力的变化大于水平方向上屈光力的变化,与本文的研究结果一致。

表 4 列出各分区的曲率半径参数,可以看出,对于同处于水平方向上的鼻侧和颞侧,鼻侧的光学区曲率半径为(8.51±0.31) mm,颞侧的光学区曲率半径为(8.42±0.27) mm,二者差别较小,但是转换区鼻侧的曲率半径为(7.17±0.34) mm,颞侧的曲率半径为(7.62±0.33) mm,其屈光能力相差较大。同理,同处于竖直方向的上侧和下侧,也是存在光学区的曲率半径差别较小,但是转换区的曲率半径差别较大的现象。这表明,转换区在鼻

侧和颞侧存在很大的不对称性,这可能与角膜塑形镜佩戴过程中存在的偏心有关^[14,21]。

表 3 水平和竖直方向上的光学区、转换区及边缘区平均分区口径及各区曲面的曲率半径

Tab. 3 Zone diameter and curvature radius of the optical zone, the transition zone and the peripheral zone in the horizontal and vertical directions (mm)

		光学区	转换区	边缘区
水平方向	分区口径	0.95±0.14	3.40±0.42	>3.40
	曲率半径	8.47±0.30	7.67±0.33	10.67±1.25
竖直方向	分区口径	0.92±0.13	3.41±0.39	>3.41
	曲率半径	8.15±0.28	7.56±0.73	11.00±1.58

表 4 鼻侧、颞侧、上侧和下侧角膜光学区、转换区及边缘的分区口径及曲率半径

Tab. 4 Zone diameter and curvature radius of the optical zone, the transition zone and the peripheral zone of the nasal,temporal,lower and upper cornea areas (mm)

		光学区	转换区	边缘区
鼻侧	分区口径	0.94±0.14	3.41±0.42	>3.41
	曲率半径	8.51±0.31	7.17±0.34	10.24±1.41
颞侧	分区口径	0.95±0.15	3.39±0.41	>3.39
	曲率半径	8.42±0.27	7.62±0.33	11.11±1.14
上侧	分区口径	0.93±0.14	3.40±0.40	>3.40
	曲率半径	8.13±0.48	7.72±0.76	10.59±1.27
下侧	分区口径	0.92±0.13	3.42±0.38	>3.42
	曲率半径	8.18±0.16	7.40±0.70	11.01±1.85

根据半个性化的人眼模型构建结果,可以得到各个视场下的周边屈光力和中心屈光力,周边屈光力减去中心屈光力即为相对周边离焦^[22-25]。图 3 给出了角膜塑形后人眼的相对周边离焦。

由图 3 可以看出,所有方向上的周边相对离焦均随视场角的增大而增大,并且颞侧和下侧更偏近视,而随着视场角从 30°增加到 40°时,周边相对离焦却减小,这与临床观测相符^[26-30]。佩镜后的人眼周边离焦表现为近视性离焦。采用本文构建的角膜面形,不仅能有效模拟出佩戴角膜塑形镜后人眼的近视性离焦,也能反映出临床观测

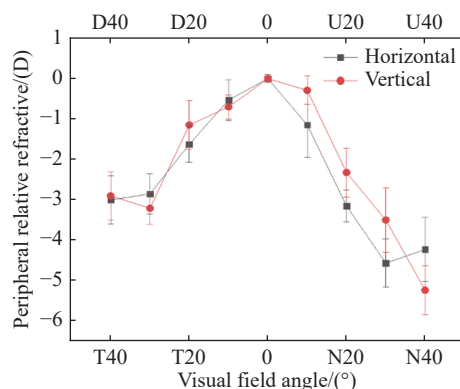


图3 不同视场下的周边相对离焦。图中下侧水平轴表示水平视场,上侧水平轴表示竖直视场。N代表鼻侧,T代表颞侧,U代表上侧,D代表下侧。垂直的短线代表该点的标准差。

Fig. 3 Peripheral relative refractions at different visual field angles. The lower and upper horizontal axes represent horizontal and vertical visual field of view respectively. N, T, U, D represents nasal, temporal, superior and inferior visual field of view respectively. The vertical bar represents the standard deviation at that point.

参考文献:

- [1] SWARBRICK H A. Orthokeratology review and update[J]. *Clinical and Experimental Optometry*, 2006, 89(3): 124-143.
- [2] KOFFLER B H, SEARS J J. Myopia control in children through refractive therapy gas permeable contact lenses: is it for real?[J]. *American Journal of Ophthalmology*, 2013, 156(6): 1076-1081.
- [3] CHO P, CHEUNG S W and EDWARDS M. The longitudinal orthokeratology research in children (LORIC) in Hong Kong: a pilot study on refractive changes and myopic control[J]. *Current Eye Research*, 2005, 30(1): 71-80.
- [4] WALLINE J J, JONES L A, SINNOTT L T. Corneal reshaping and myopia progression[J]. *British Journal of Ophthalmology*, 2009, 93(9): 1181-1185.
- [5] VERKICARLA P K, SUHEIMAT M, SCHMID K L, et al.. Peripheral refraction, peripheral eye length, and retinal shape in myopia[J]. *Optometry and Vision Science*, 2016, 93(9): 1072-1078.
- [6] 李前,何书喜. 周边屈光对近视的影响[J]. *国际眼科杂志*, 2013, 13(9): 1795-1798.
LI Q, HE SH X. Influence of peripheral refraction on myopia[J]. *International Eye Science*, 2013, 13(9): 1795-1798. (in Chinese)
- [7] ENDL M J, MARTINEZ C E, KLYCE S D, et al.. Effect of larger ablation zone and transition zone on corneal optical aberrations after photorefractive keratectomy[J]. *Archives of Ophthalmology*, 2001, 119(8): 1159-1164.
- [8] QUEIRÓS A, GONZÁLEZ-MÉIJOME J M, VILLA-COLLAR C, et al.. Local steepening in peripheral corneal curvature after corneal refractive therapy and LASIK[J]. *Optometry and Vision Science*, 2010, 87(6): 432-439.
- [9] REINSTEIN D Z, GOBBE M, ARCHER T J, et al.. Epithelial, stromal, and corneal pachymetry changes during orthokeratology[J]. *Optometry and Vision Science*, 2009, 86(8): E1006-E1014.
- [10] ALHARBI A, SWARBRICK H A. The effects of overnight orthokeratology lens wear on corneal thickness[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2003, 44(6): 2518-2523.
- [11] 吕帆. 角膜塑形镜在控制近视进展中的作用[J]. *中国眼镜科技杂志*, 2018(21): 92-93.

到的水平和竖直方向的不对称性,及鼻侧、颞侧、上侧和下侧的不对称性^[20]。

经过上述一系列分析可知,采用本文方法构建的佩戴塑形镜后的人眼角膜模型与临床观测数据相吻合,而且有效反映出了各个方向的不对称性。这为角膜塑形后人眼光学性能的分析,提供了一个有力的分析工具。后续将扩大样本数量进行临床相关的统计学研究。

4 结 论

本文提出了一种新的构建塑形后角膜面形的方法。通过设置参考面形,消除了角膜本体厚度对塑形后角膜面形的影响,计算出角膜的3个分区口径,并给出了对应的曲率半径。本方法也反映出塑形后人眼角膜各方向上的不对称性。利用所求参数建立半定制化的眼模型,进而利用光学追迹软件分析人眼周边的相对屈光力情况。分析结果显示周边离焦为近视性偏移,与临床观测一致。

- LU F. The role of keratoplasty in controlling the progression of myopia[J]. *China Glasses Science-Technology Magazine*, 2018(21): 92-93. (in Chinese)
- [12] FARIA-RIBEIRO M, BELSUE R N, LÓPEZ-GIL N. Morphology, topography, and optics of the orthokeratology cornea[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2016, 21(7): 075011.
- [13] LU F H, SIMPSON T, SORBARA L, *et al.*. The relationship between the treatment zone diameter and visual, optical and subjective performance in corneal refractive therapyTM lens wearers[J]. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 2007, 27(6): 568-578.
- [14] ZHONG Y Y, CHEN ZH, XUE F, *et al.*. Corneal power change is predictive of myopia progression in orthokeratology[J]. *Optometry and Vision Science*, 2014, 91(4): 404-411.
- [15] 张玉轩, 吴佳译, 郑昌文. 基于Navarro示意眼模型的视觉真实感绘制[J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(8): 3124-3127, 3130.
- ZHANG Y X, WU J Z, ZHENG CH W. Schematic eye model-based vision-realistic rendering[J]. *Application Research of Computers*, 2011, 28(8): 3124-3127, 3130. (in Chinese)
- [16] 陈浩, 宣丽, 胡立发, 等. 望远镜的紧凑型闭环液晶自适应光学系统设计[J]. *液晶与显示*, 2010, 25(3): 379-385.
- CHEN H, XUAN L, HU L F, *et al.*. Design on compact type closed-loop liquid crystal adaptive optical system for telescope[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(3): 379-385. (in Chinese)
- [17] 孔梅梅, 高志山, 陈磊, 等. 基于人眼光学模型建立的角膜模型[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(4): 707-712.
- KONG M M, GAO ZH SH, CHEN L, *et al.*. Corneal model based on human eye optical models[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(4): 707-712. (in Chinese)
- [18] 周峰, 闫海, 王晓莉, 等. 基于ZEMAX用户自定义操作数的波前编码成像系统优化设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 528-535.
- ZHOU F, YAN H, WANG X L, *et al.*. Optimization of wavefront coding imaging systems based on ZEMAX user defined operands[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(3): 528-535. (in Chinese)
- [19] 李鹏飞, 许金凯, 胡立发, 等. 人眼像差校正仪成像CCD随动控制的设计与实现[J]. *液晶与显示*, 2010, 25(5): 733-737.
- LI P F, XU J K, HU L F, *et al.*. Design and realization of focus auto adjustment for imaging CCD in retinal aberration correction setup[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(5): 733-737. (in Chinese)
- [20] 曹正林, 廖文和, 沈建新. Zernike多项式拟合人眼波前像差的一种新算法[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 308-314.
- CAO ZH L, LIAO W H, SHEN J X. A new algorithm for human eye's wave-front aberration fitting with Zernike polynomial[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(2): 308-314. (in Chinese)
- [21] 王红波, 孙凤仙, 王敏婷. 降低远视离焦对儿童近视发展的影响[J]. *中国斜视与小儿眼科杂志*, 2014, 22(2): 22-24.
- WANG H B, SUN F X, WANG M T. Clinical study of reducing hyperopic optical defocus on children's development of myopia[J]. *Chinese Journal of Strabismus & Pediatric Ophthalmology*, 2014, 22(2): 22-24. (in Chinese)
- [22] 高稳生, 陈子林. 角膜塑形术在近视治疗中的作用机制[J]. *中国医药科学*, 2015, 5(1): 60-62.
- GAO W SH, CHEN Z L. The action mechanism of orthokeratology in the treatment of myopia[J]. *China Medicine and Pharmacy*, 2015, 5(1): 60-62. (in Chinese)
- [23] 陈明璿, 陈柏儒, 林怡欣. 基于液晶透镜的电控式光学影像缩放系统[J]. *液晶与显示*, 2015, 30(3): 375-380.
- CHEN M R, CHEN B R, LIN Y X. Electrically tunable optical zoom system based on liquid crystal lenses[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(3): 375-380. (in Chinese)
- [24] 余鑫鑫, 李大禹, 夏明亮, 等. 基于液体变焦透镜离焦补偿机构的设计[J]. *液晶与显示*, 2013, 28(3): 344-348.
- YU X X, LI D Y, XIA M L, *et al.*. Design of defocus compensate mechanism based on liquid lens[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(3): 344-348. (in Chinese)
- [25] 黄德天, 刘雪超, 张红胜, 等. 基于人类视觉的快速自动调焦法[J]. *液晶与显示*, 2014, 29(5): 768-776.
- HUANG D T, LIU X CH, ZHANG H SH, *et al.*. Fast auto-focusing method based on human visual system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5): 768-776. (in Chinese)
- [26] 周琨, 王肖, 吴晓璇, 等. 夜戴型角膜塑形镜矫正青少年近视疗效及其影响因素分析[J]. *中国实用眼科杂志*, 2017, 35(2): 136-142.

- ZHOU J, WANG X, WU X X, *et al.*. Clinic effect and relevant influencing factors of overnight orthokeratology in myopic adolescent[J]. *Chinese Journal of Practical Ophthalmology*, 2017, 35(2): 136-142. (in Chinese)
- [27] QUEIRÓS A, GONZÁLEZ-MÉIJOME J M, JORGE J, *et al.*. Peripheral refraction in myopic patients after orthokeratology[J]. *Optometry and Vision Science*, 2010, 87(5): 323-329.
- [28] MATHUR A, ATCHISON D A. Effect of orthokeratology on peripheral aberrations of the eye[J]. *Optometry and Vision Science*, 2009, 86(5): E476-E484.
- [29] SANKARIDURG P, HOLDEN B, SMITH III E, *et al.*. Decrease in rate of myopia progression with a contact lens designed to reduce relative peripheral hyperopia: one-year results[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2011, 52(13): 9362-9367.
- [30] 陈志, 瞿小妹, 周行涛. 角膜塑形镜对周边屈光度的影响及其作用机制[J]. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2012, 14(2): 74-78.
- CHEN ZH, QU X M, ZHOU X T. Effects of orthokeratology on peripheral refraction and its mechanism[J]. *Chinese Journal of Optometry Ophthalmology and Visual Science*, 2012, 14(2): 74-78. (in Chinese)

作者简介:



刘宝凯(1994—),男,河北衡水人,硕士研究生,2013年于哈尔滨工程大学获得学士学位,主要研究方向为视光学。E-mail: 823064666@qq.com



刘永基(1977—),女,河北昌黎人,博士,副研究员,1999年于河北师范大学获学士学位,2002年于华中科技大学获硕士学位,2005年于南开大学获博士学位。主要研究方向为眼视光学、光学设计等。E-mail: yjliu@nankai.edu.cn