

球差和彗差在角膜塑形镜控制近视中的作用

张守宽, 彭庆生, 张磊

引用: 张守宽, 彭庆生, 张磊. 球差和彗差在角膜塑形镜控制近视中的作用. 国际眼科杂志, 2024, 24(1): 88-92.

作者单位: (256600) 中国山东省滨州市, 滨州医学院附属医院眼科

作者简介: 张守宽, 滨州医学院在读硕士研究生, 研究方向: 眼视光学。

通讯作者: 张磊, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主任医师, 主任, 研究方向: 近视防控、神经眼科. zhangleisd@263.net

收稿日期: 2023-03-14 修回日期: 2023-11-27

摘要

近视作为全球高发疾病, 严重影响我国青少年的眼部健康。角膜塑形镜是一种能有效控制近视增长速度的硬性角膜接触镜, 但其作用机制尚未完全探明。而高阶像差作为影响视觉质量的因素之一, 在角膜塑形术后会发生显著变化, 其中以球面像差(球差)、彗形像差(彗差)较为关键。角膜塑形镜使角膜形态发生改变后, 导致球差和彗差显著正向增加, 球差和彗差的增加量与角膜塑形术后眼轴增长的速度呈显著负相关。球差与离焦和调节、彗差与散光和伪调节等存在的相互作用可能是其在角膜塑形镜控制近视中发挥作用的机制。

关键词: 角膜塑形镜; 高阶像差; 球差; 彗差; 近视; 眼轴

DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2024.1.17

Role of spherical aberration and coma in orthokeratology for myopia control

Zhang Shoukuan, Peng Qingsheng, Zhang Lei

Department of Ophthalmology, Binzhou Medical University Hospital, Binzhou 256600, Shandong Province, China

Correspondence to: Zhang Lei. Department of Ophthalmology, Binzhou Medical University Hospital, Binzhou 256600, Shandong Province, China. zhangleisd@263.net

Received: 2023-03-14 Accepted: 2023-11-27

Abstract

• As a highly prevalent global condition, myopia significantly impacts the ocular health of young individuals in China. Orthokeratology lens, as a rigid corneal contact lens, has demonstrated effective control over the progression of myopia; however, its mechanism of action remains incompletely elucidated. As one of the factors influencing visual acuity, higher-order aberrations will undergo marked changes after orthokeratology, with particular emphasis on the alterations in spherical aberrations and coma. The changes in corneal

morphology induced by orthokeratology lead to significant positive increase in both spherical aberration and coma. Furthermore, the elevation of spherical aberration and coma demonstrates a negative correlation with the rate of axial length growth following orthokeratology. The interplay among spherical aberration, coma, defocus, accommodation, astigmatism, and pseudo-accommodation may constitute the underlying mechanism governing the control of myopia through orthokeratology.

• KEYWORDS: orthokeratology lens; higher-order aberrations; spherical aberration; coma; myopia; axial length

Citation: Zhang SK, Peng QS, Zhang L. Role of spherical aberration and coma in orthokeratology for myopia control. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)*, 2024, 24(1): 88-92.

0 引言

近视是指调节放松时外界平行光线经眼球屈光系统后成像于视网膜之前的一种屈光不正。近视的程度主要与角膜曲率和眼轴长度相关, 由于角膜曲率在4岁时已发育到+43 D左右, 后续不会随着年龄而变化^[1], 所以学龄期儿童的近视进展主要由于眼轴长度的增加所导致^[2]。但是近视并不仅仅是一种屈光不正, 高度近视(眼轴 ≥ 26 mm或-6.25 D及以上)能够引起许多眼部并发症, 例如视网膜脉络膜变性^[3]、青光眼^[4]、黄斑病变^[5]等, 并具有遗传倾向^[6]。流行病学调查显示, 我国初中生近视率已达到50%以上, 高度近视率达7%以上^[7]; 高中生近视率接近80%, 高度近视率达15%以上^[8]。目前, 为了控制近视增长速度, 降低高度近视率, 角膜塑形(orthokeratology, OK)镜被广泛应用于学龄期儿童。而OK镜作用机制尚不完全明确, 近年来有研究表明球面像差(简称为球差)和彗形像差(简称为彗差)在OK镜控制近视中起作用, 本文就球差和彗差在OK镜控制近视中的作用进行综述。

1 角膜塑形镜

OK镜是一种逆几何形态设计的硬性透气性接触镜, 作用于角膜后可以使角膜中央区曲率变平, 从而暂时降低近视度数, 提高裸眼视力。自20世纪60年代问世以来, 经过半个多世纪的发展, 其有效性以及安全性在国内外已经得到证实^[9-11]。VST设计的OK镜可分为4个弧区, 从内向外分别为基弧区、反转弧区、平行弧区和周边弧区。基弧区曲率较角膜中央区曲率平坦, 作用于角膜后使角膜曲率下降, 暂时降低近视度数, 以形成良好的中心视力, 但最大降幅不能超过-6.00 D, 所以OK镜常用于轻、中度近视。反转弧区曲率较基弧区陡, 有较厚泪液层, 可容纳基弧区挤压而外移的角膜上皮组织, 因此反转弧作用区角膜

厚度略增加,且形成高曲率离焦环。此离焦环能够使视网膜周边形成近视离焦,被认为是角膜塑形镜控制近视的作用机制之一^[12-13]。

2 高阶像差

像差包括低阶像差和高阶像差。高阶像差是指 Zernike 多项式中三阶及以上的像差。当低阶像差(离焦和规则散光)存在时,高阶像差对视觉质量的影响容易被忽略。当低阶像差被传统镜片(框架眼镜、角膜接触镜等)矫正后,高阶像差对视觉质量的影响就会显现出来。在 Zernike 多项式中,高阶像差阶数越高对视觉质量影响越小,并且每一阶像差内靠近 Zernike 多项式金字塔中间的项对光学质量的影响高于靠近边缘的项^[14-15]。同时,在人眼光学系统中,越高阶的像差占比越少^[15]。因此,低阶像差矫正后,位于三、四阶中间项的高阶像差(球面像差、彗形像差等)就成为影响视觉质量的关键因素。

2.1 球差 球差是指轴上物点发出的远轴光线经大孔径球镜后与光轴的交点位于理想像点之前或之后。一个物点经过有球差的光学系统后在不同平面的像为大小不同的弥散斑。球差有正负之分,正球差是指理想像点位于球镜、远轴光线与光轴交点之间,经过负球镜可产生;反之,则为负球差,经过正球镜可产生。由于角膜前表面曲率半径约为 7.7 mm,后表面曲率半径约为 6.8 mm,其几何形状类似一个凹透镜,但是因为角膜前表面接触空气(折射率 $n=1$),后表面接触房水(折射率 $n'=1.336$),所以其对光线反而产生汇聚作用,总屈光力约为 +43 D,所以这可能是光线经角膜产生汇聚作用且球差常为正值^[16]的原因。同理,晶状体前后分别为房水和玻璃体,折射率均为 1.336,所以双凸形状的晶状体所成球差为负球差,晶状体变凸可能是调节时眼内球差向负值偏移^[17]的原因。

2.1.1 球差与近视的相关性 Xu 等^[18]关于高度近视的儿童球差与眼轴长度关系的研究发现,球差和眼轴长度存在相关性,但是他们认为这并不代表球差与眼轴的增长速度之间存在因果关系。一项在日本学龄期儿童中关于近视进展速度与眼部高阶像差的纵向研究^[19]显示,在 64 名平均年龄 9.2 岁的受试者长达 2 a 的观察中,发现角膜球差均方根值与近视进展和眼轴增长速度呈负相关,全眼球差均方根值仅与眼轴增长速度呈负相关性。他们认为球差能够显著提高焦深^[20],所以患者付出较少的调节即可提高成像质量。长时间视近时,这种作用可能会延缓视疲劳的产生,减少调节滞后量和远视离焦的出现。另外,根据机械张力假说^[21],球差增大而减少的调节力会减少眼球赤道部的机械张力,从而可以延缓眼轴的增长。所以,球差对调节的影响可能是其与近视进展呈负相关性的原因。

2.1.2 角膜塑形术后球差的变化趋势 OK 镜会导致角膜非生理形态的改变,在角膜塑形术后,角膜中央区变薄、屈光力下降,周边区变厚、屈光力增加^[22-23],此时角膜球差正向增加,且随着降幅的增加,角膜周边-中央屈光力、厚度差值逐渐增加,球差正向增加更多^[24]。Tomiyaama 等^[25]针对散光度数较高的受试者配戴环曲面 OK 镜的研究,于配戴 10 d 后、5 mm 瞳孔直径下测量高阶像差,发现球差较基线时显著正向增加,从 $0.05 \pm 0.07 \mu\text{m}$ 增加到 $0.41 \pm 0.16 \mu\text{m}$ 。王小涛等^[26]在 6 mm 瞳孔直径下测量配戴 OK 镜前后的高阶像差,球差从基线时 $0.163 \pm 0.18 \mu\text{m}$ 增加到

12 mo 时的 $0.486 \pm 0.248 \mu\text{m}$ 。Chen 等^[27]研究发现,配戴 OK 镜前和戴镜 3 mo 后 4、5、6 mm 瞳孔直径下的球差均显著正向增加,且随着瞳孔直径、降幅的增加而增加。可见,在角膜塑形术后,可能由于周边-中央厚度差值继续增加,使角膜形态向负球镜方向偏移,导致球差均方根值正向偏移。并且瞳孔直径越大,角膜塑形后产生的高曲率区进入瞳孔内的面积越大,这可能是球差随着瞳孔直径增加而增加的原因。

2.1.3 球差在角膜塑形镜控制近视中的作用 如上所述,球差在近视的发生进展中可能发挥作用,并且角膜塑形术后球差显著正向增加,那么球差的变化与 OK 镜控制近视的效果是否存在关联? Lau 等^[28]在 6 mm 瞳孔直径下测量戴镜 2 a 后高阶像差,全眼总高阶像差和球差分别正向增加了 3、9 倍,并且总高阶像差和球差的均方根值越大,正球差水平越高,则眼轴增长速度越慢。同时他们对比了眼轴长度发展快和慢的 2 例患者的高阶像差,发现发展慢的受试者的总高阶像差和球差明显高于发展快的。Lee 等^[29]研究发现,角膜塑形术后全眼和角膜的总高阶像差、球差均正向增加,且角膜和全眼球差变化量与降幅呈正相关,与眼轴增长率呈负相关。孙笑笑等^[30]测量近视性屈光参差儿童两只眼睛同时配戴 OK 镜后的高阶像差与眼轴长度增加量的关系,发现戴镜 12 mo 时角膜前表面直径 3.0 mm 范围内的角膜总高阶像差和球差的正向增加量,均与眼轴长度增加量呈负相关。以上研究发现,角膜塑形术后无论是全眼还是角膜高阶像差和球差均正向增加,且球差的增加量均与眼轴增长速度呈显著负相关。

除了上述研究认为球差可能会增加焦深、减少眼球赤道部的机械张力之外,还有研究发现球差与其他像差之间存在相互作用。方利华等^[31]进行了球差和离焦补偿关系的研究,发现符号相同的球差和离焦在一定程度内可以相互补偿,显著提高光学质量。并且在一定范围内随着球差的增加,达到最佳视觉质量的离焦量也相应增加,所达到的最佳视觉质量高于只存在球差时的视觉质量。Niu 等^[32]发现在像差的共轭组合中,像差越大,组合后光学质量的改善越多。同时,他们进行了离焦和初级球差组合前后的视觉目标“E”的成像结果对比,发现组合后视觉目标的成像质量显著提高。而离焦又经常与调节相关联,当患者学习压力较大或使用电子产品较多时,容易产生视疲劳症状^[33-34],调节滞后量显著增加,导致视网膜成像时形成远视离焦(负离焦),与正球差结合使视觉效果变差。但是配戴角膜塑形镜后调节幅度增加^[35],视疲劳症状减轻,调节滞后量减少^[36],改善远视离焦,增加负球差,从而提高视觉质量。并且角膜是弹性组织,摘镜后几小时内角膜轻微回弹,可能会产生近视性离焦^[37](正离焦),此时符号相同的离焦与球差相互作用能够显著提高视觉质量。所以,角膜塑形术后球差、调节、离焦之间的相互作用可能在 OK 镜控制近视中发挥了重要作用。

2.2 彗差 彗差是指轴外物点发出的宽光束经光学系统后在像平面形成的彗星形状的弥散斑,此弥散斑以靠近主光线的细光束交于主光线的亮点为顶点。彗差是不对称的,其大小是以所形成弥散斑的不对称程度来表示。彗差包括子午彗差和弧矢彗差,弧矢彗差为子午彗差的 1/3,分别位于相互垂直的子午面和弧矢面内。彗差也有正负

之分,彗差的尖端指向视场中心的称为正彗差,彗差的尖端指向视场边缘的称为负彗差。

2.2.1 彗差与近视的关系 因为彗差属于轴外像差,在正常情况下眼内屈光系统几乎是同轴的,这可能是彗差均方根值较小^[38]的原因,并且其与近视的相关性尚不明确。有研究发现其与近视程度没有相关性^[39-40],但是 Zhang 等^[16]发现眼轴长度与水平彗差值呈正相关。也有研究^[41]发现近视进展速度与彗差均方根值呈正相关,近视增长速度快的儿童彗差均方根值高于进展慢的儿童。此外,也有研究发现彗差与散光大小相关,Cakir 等^[42]发现散光度数大于 2.0 D 的儿童眼部彗差为 $0.35\pm 0.12\ \mu\text{m}$,正常散光儿童的彗差值为 $0.25\pm 0.11\ \mu\text{m}$ 。Zhang 等^[16]发现散光值与角膜垂直彗差值呈正相关。上述研究可能因为年龄或个体间差异而得出不同的结论,所以进行彗差与近视进展的纵向评估可能会进一步解释它们之间的关系。

2.2.2 角膜塑形术后彗差的变化趋势 角膜塑形术后角膜形态改变,因为戴镜前等效球镜度^[43]、角膜散光^[44]等因素的影响,导致戴镜后中央治疗区经常偏离角膜中心。崔晓剑^[45]同时测量了配戴 OK 镜后 3 mm 和 6 mm 瞳孔直径下的角膜高阶像差,发现角膜塑形术后治疗区主要向颞下方偏心,1 mo 后角膜总彗差、垂直彗差、水平彗差均显著正向增加并趋于稳定,并且偏心距离与角膜总高阶像差、彗差大小呈显著正相关,3 mm 瞳孔直径时的各项彗差明显小于 6 mm 瞳孔直径时。Tomiyama 等^[25]于配戴 OK 镜 10d 后测量 5 mm 瞳孔直径下的高阶像差,发现彗差较基线时显著正向增加,从 $0.15\pm 0.07\ \mu\text{m}$ 增加到 $0.43\pm 0.19\ \mu\text{m}$ 。Ding 等^[46]研究发现配戴 OK 镜后全眼彗差显著正向增加,并且停戴后 1mo 显著下降,但仍然高于基线时。Chen 等^[47]研究发现,配戴 OK 镜 1 mo 时,在 4 mm 瞳孔直径下,全眼彗差从 $0.12\pm 0.19\ \mu\text{m}$ 增加到 $0.36\pm 0.23\ \mu\text{m}$,其变化趋势与角膜彗差趋势相同。Lian 等^[22]发现配戴 OK 镜后角膜中周-中心厚度变化差异与角膜彗差的变化呈正相关。综上所述,配戴 OK 镜后,角膜塑形常出现偏心现象,彗差均方根值常与降幅、偏心量^[48]和瞳孔直径成正比,且彗差值在戴镜后均显著正向增加。

2.2.3 彗差在角膜塑形镜控制近视中的作用 如上所述,角膜塑形术后彗差显著正向增加,彗差值的变化与角膜塑形术后近视控制效果是否存在关联? Kim 等^[49]研究证明,配戴 OK 镜后全眼彗差和三阶像差的均方根值均显著正向增加,并且三阶像差与彗差的正向增加量与眼轴增长速度呈负相关。孙笑笑等^[30]发现戴镜 12 mo 时角膜前表面直径 3.0、6.0 mm 范围内的角膜彗差的正向增加量均与眼轴长度增加量呈负相关。陈敏峰等^[50]研究发现,角膜塑形术后偏心距离与眼轴增加速度呈负相关,重度偏心组 2 a 间眼轴变化 $0.17\pm 0.18\ \text{mm}$,中度偏心组眼轴增加 $0.37\pm 0.28\ \text{mm}$,轻度偏心组眼轴增加 $0.52\pm 0.35\ \text{mm}$ 。同样,Zhang 等^[51]和 Lin 等^[52]均发现角膜塑形术偏心距离与眼轴增长速度呈显著负相关,并且他们均认为高阶像差可能在其中发挥了积极作用。Hiraoka 等^[53]在 4 mm 瞳孔直径下对配戴 OK 镜 1 a 的 55 例受试者进行高阶像差的测量,发现 OK 镜治疗后全眼和角膜彗差和总高阶像差量均显著正向增加,并且随着彗差均方根值的正向增加,眼轴增长速度越慢。他们认为角膜塑形术后彗差的增加可能导

致角膜伪调节力增加,最终影响眼轴生长。

伪调节是指由于角膜像差、景深、角膜多焦等原因而产生的类似调节的作用。Oshika 等^[54]研究发现,角膜伪调节量与角膜多焦度、角膜彗差呈显著正相关,他们认为角膜屈光力的不对称分布是伪调节量增加的原因。并且他们发现彗差与 0.50 D 的正离焦结合后,图像的斯特列尔比从 0.023 增加到 0.043。在 de Gracia 等^[55]的一项研究中同时测量了视觉质量和斯特列尔比,发现在 -1 D 到 1 D 的离焦范围、消除其他像差影响的情况下,彗差和散光通过一定比例组合时,其斯特列尔比和视觉质量(高对比度下)均会显著增加。de Gracia 等^[56]在后续的研究中,设置了三组受试者,分别是无自然散光者、有散光习惯矫正者、有散光未矫正者,分别在这三组设置不同的离焦、相对角度和彗差,发现无自然散光者视觉效果提高,有散光习惯矫正者未发现明显变化,有散光未矫正者反而视觉效果下降,该作者认为可能是因为神经对这种散光状态的适应导致了这种结果,这表明在散光与彗差组合作用时,其产生的效果并不是一成不变的。总之,角膜塑形术后彗差的增加可能与离焦、散光相互作用提高了视觉质量,或增加了伪调节量,从而在 OK 镜控制近视中发挥了作用。

3 小结与展望

角膜塑形术后角膜形态发生改变,在降低角膜中央曲率的同时导致球差和彗差均方根值正向增加。球差和彗差单独存在时均降低视觉质量,但是在角膜塑形术后存在诸多因素与球差和彗差相互作用,从而产生许多正面效果,证明了球差和彗差在 OK 镜控制近视中发挥着积极作用。目前提出的假设包括球差与离焦、球差与调节、彗差与散光、彗差与伪调节相互作用。但是降幅的增加不仅会引起球差的增加,还会导致中-周部角膜高曲率区的曲率继续增加,从而增加周边视网膜的近视离焦。而治疗区偏心量的增加不仅会导致彗差的增加,也会导致中周部角膜的高曲率区向瞳孔内偏移,导致高曲率区更贴近瞳孔中央,且进入瞳孔的近视离焦增加。所以角膜塑形镜控制近视是多因素作用的结果,验配角膜塑形镜不必严格控制其治疗区居中,在保证患者的角膜安全的前提下,存在轻微的过矫和偏位反而可能产生更好的控制效果。

参考文献

- [1] 李嘉,王军. 4~16 岁儿童眼轴和角膜曲率的分布及相关因素研究. 眼科, 2017,26(5):307-312.
- [2] 魏聪,刘佳,卢亚梅. 3~15 岁儿童青少年眼轴与屈光状态变化分析. 中国斜视与小儿眼科杂志, 2021,29(4):31-32,34-35.
- [3] Liu R, Guo XX, Xiao O, et al. Diffuse chorioretinal atrophy in Chinese high myopia: the zoc-bhvi high myopia cohort study. Retina, 2020,40(2):241-248.
- [4] Tham YC, Aung T, Fan Q, et al. Joint effects of intraocular pressure and myopia on risk of primary open-angle glaucoma: the Singapore epidemiology of eye diseases study. Sci Rep, 2016,6:19320.
- [5] Hayashi K, Ohno-Matsui K, Shimada N, et al. Long-term pattern of progression of myopic maculopathy: a natural history study. Ophthalmology, 2010,117(8):1595-1611.
- [6] 李倩,张晟,卢次勇,等. 广州市 1~2 年级小学生近视与父母近视关系. 中国公共卫生, 2022,38(6):676-679.
- [7] 韩蕾. 沈阳地区儿童青少年近视率的现况调查. 中国医科大学, 2021.
- [8] 赵星星,鲁鑫,李剑,等. 西安市同区域不同学段学生近视率差异及原因分析. 国际眼科杂志, 2022,22(9):1587-1591.

- [9] 王怡然. 角膜塑形镜对儿童角膜、眼轴和脉络膜厚度及血流的影响. 郑州大学, 2020.
- [10] Hiraoka T, Sekine Y, Okamoto F, et al. Safety and efficacy following 10 - years of overnight orthokeratology for myopia control. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2018,38(3):281-289.
- [11] 李昆, 彭娟, 马建洲, 等. 角膜塑形镜治疗青少年近视的临床观察. *国际眼科杂志*, 2019,19(9):1626-1628.
- [12] Lipson MJ, Brooks MM, Koffler BH. The role of orthokeratology in myopia control: a review. *Eye Contact Lens*, 2018,44(4):224-230.
- [13] Lee EJ, Lim DH, Chung TY, et al. Association of axial length growth and topographic change in orthokeratology. *Eye Contact Lens*, 2018,44(5):292-298.
- [14] 徐欢欢, 葛轶睿, 黄振平. 波前像差对视觉质量的影响分析. *临床眼科杂志*, 2020,28(5):456-458.
- [15] Xu AC, Rao F. Analysis on visual imaging quality affected by human eye's higher order aberration measurement via off-axis wavefront. *Optom Open Access*, 2016,1(3):121.
- [16] Zhang X, Ma JH, Xi X, et al. Characteristics of corneal high-order aberrations in adolescents with mild to moderate myopia. *BMC Ophthalmol*, 2020,20(1):465.
- [17] Hughes RPJ, Read SA, Collins MJ, et al. Higher order aberrations and retinal image quality during short-term accommodation in children. *Vision Res*, 2021,188:74-84.
- [18] Xu YP, Deng JJ, Zhang B, et al. Higher-order aberrations and their association with axial elongation in highly myopic children and adolescents. *Br J Ophthalmol*, 2023,107(6):862-868.
- [19] Hiraoka T, Kotsuka J, Kakita T, et al. Relationship between higher-order wavefront aberrations and natural progression of myopia in schoolchildren. *Sci Rep*, 2017,7(1):7876.
- [20] Yeu E, Wang L, Koch DD. The effect of corneal wavefront aberrations on corneal pseudoaccommodation. *Am J Ophthalmol*, 2012,153(5):972-981.e2.
- [21] Drexler W, Findl O, Schmetterer L, et al. Eye elongation during accommodation in humans; differences between emmetropes and myopes. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 1998,39(11):2140-2147.
- [22] Lian Y, Shen MX, Huang SH, et al. Corneal reshaping and wavefront aberrations during overnight orthokeratology. *Eye Contact Lens*, 2014,40(3):161-168.
- [23] Haque S, Fonn D, Simpson T, et al. Corneal and epithelial thickness changes after 4 weeks of overnight corneal refractive therapy lens wear, measured with optical coherence tomography. *Eye Contact Lens*, 2004,30(4):189-193;discussion 205-206.
- [24] Hiraoka T, Matsumoto Y, Okamoto F, et al. Corneal higher-order aberrations induced by overnight orthokeratology. *Am J Ophthalmol*, 2005,139(3):429-436.
- [25] Tomiyama ES, Hu C, Marsack JD, et al. Greater higher order aberrations induced by toric orthokeratology versus soft toric multifocal contact lens wear. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2021,41(4):726-735.
- [26] 王小涛, 陈海英, 刘刚, 等. Toric 设计角膜塑形镜矫正近视伴高度散光对角膜高阶像差的影响. *眼科*, 2021,30(2):125-129.
- [27] Chen CX, Ma W, Wang JL, et al. Higher-order aberrations and visual performance in myopic children treated with aspheric base curve-designed orthokeratology. *Eye Contact Lens*, 2023,49(2):71-76.
- [28] Lau JK, Vincent SJ, Cheung SW, et al. Higher-order aberrations and axial elongation in myopic children treated with orthokeratology. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2020,61(2):22.
- [29] Lee DH, Lee JE. Correlation among myopic correction, axial length and aberration after orthokeratology lens treatment in myopic patients. *J Korean Ophthalmol Soc*, 2016,57(7):1050.
- [30] 孙笑笑, 张钰, 陈跃国. 角膜塑形镜诱导角膜高阶像差改变与控制儿童近视性屈光参差的相关性研究. *中华眼科杂志*, 2022,58(4):250-258.
- [31] 方利华, 何兴道, 李淑静. 基于人眼光学质量的球差和离焦补偿关系研究. *光子学报*, 2010,39(1):110-115.
- [32] Niu SS, Shen JX, Liao WH, et al. Study on linear conjugated combination of Zernike modes. *Chinese Optics Letters*, 2013,11(2):82-87.
- [33] 曹文婷, 嵇红, 杜娜, 等. 青少年视疲劳现状调查及影响因素分析. *吉林医学*, 2021,42(7):1682-1685.
- [34] 张源, 马恩普, 潘蓓, 等. 视频终端尺寸对儿童视疲劳的影响. *武警医学*, 2022,33(12):1016-1019.
- [35] 朱梦钧, 丁莉, 李珊珊, 等. 配戴角膜塑形镜后调节幅度的改变及其控制近视进展的临床观察. *国际眼科杂志*, 2022,22(2):293-297.
- [36] Batres L, Peruzzo S, Serramito M, et al. Accommodation response and spherical aberration during orthokeratology. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2020,258(1):117-127.
- [37] 谢姝, 王朝阳, 刘津津. 佩戴角膜塑形镜后出现视力波动的原因分析. *当代医学*, 2022,28(9):33-35.
- [38] 孔繁学. 正视眼高阶像差和视觉质量的研究. 大连医科大学, 2008.
- [39] Li X, Hu Q, Wang QR, et al. Analysis of ocular structural parameters and higher-order aberrations in Chinese children with myopia. *World J Clin Cases*, 2021,9(27):8035-8043.
- [40] Sun XX, Zhang Y, Chen YG. Corneal aberrations and anisometropia in children. *Clin Exp Optom*, 2022,105(8):801-805.
- [41] Zhang N, Yang XB, Zhang WQ, et al. Relationship between higher-order aberrations and myopia progression in schoolchildren; a retrospective study. *Int J Ophthalmol*, 2013,6(3):295-299.
- [42] Çakır B, Aksoy NÖ, Özmen S, et al. Corneal topography, anterior segment and high-order aberration assessments in children with ≥ 2 diopter astigmatism. *Int Ophthalmol*, 2020,40(6):1461-1467.
- [43] 韦伟, 王晓睿, 孙西宇, 等. 影响角膜塑形镜偏心定位的相关因素分析. *眼科新进展*, 2019,39(7):654-657.
- [44] Maseedupally VK, Gifford P, Lum E, et al. Treatment zone decentration during orthokeratology on eyes with corneal toricity. *Optom Vis Sci*, 2016,93(9):1101-1111.
- [45] 崔晓剑. 角膜塑形术后光学治疗区大小及偏心对脉络膜厚度和角膜高阶像差的影响. 汕头大学, 2022.
- [46] Ding CL, Chen YY, Li X, et al. The associations of accommodation and aberrations in myopia control with orthokeratology. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2022,42(2):327-334.
- [47] Chen QZ, Li M, Yuan Y, et al. Interaction between corneal and internal ocular aberrations induced by orthokeratology and its influential factors. *Biomed Res Int*, 2017,2017:3703854.
- [48] 陈子扬, 叶照达, 张晔, 等. 角膜塑形镜的偏心对眼轴及视觉质量的影响. *国际眼科杂志*, 2020,20(12):2023-2027.
- [49] Kim J, Lim DH, Han SH, et al. Predictive factors associated with axial length growth and myopia progression in orthokeratology. *PLoS One*, 2019,14(6):e0218140.
- [50] 陈敏锋, 刘新婷, 张芬, 等. 儿童配戴角膜塑形镜后镜片偏心对近视控制的影响. *眼科*, 2020,29(5):345-349.
- [51] Zhang SX, Zhang H, Li LH, et al. Effect of treatment zone decentration on axial length growth after orthokeratology. *Front Neurosci*, 2022,16:986364.
- [52] Lin WP, Li N, Gu TP, et al. The treatment zone size and its decentration influence axial elongation in children with orthokeratology treatment. *BMC Ophthalmol*, 2021,21(1):362.
- [53] Hiraoka T, Kakita T, Okamoto F, et al. Influence of ocular wavefront aberrations on axial length elongation in myopic children treated with overnight orthokeratology. *Ophthalmology*, 2015,122(1):93-100.
- [54] Oshika T, Mimura T, Tanaka S, et al. Apparent accommodation

and corneal wavefront aberration in pseudophakic eyes. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2002,43(9):2882-2886.

[55] de Gracia P, Dorronsoro C, Gamba E, et al. Combining coma with astigmatism can improve retinal image over astigmatism alone. Vision

Res, 2010,50(19):2008-2014.

[56] de Gracia P, Dorronsoro C, Marin G, et al. Visual acuity under combined astigmatism and coma: optical and neural adaptation effects. J Vis, 2011,11(2):5.

2022 中科院期刊分区表全球眼科学期刊分区及排名

2022年中国科学院文献情报中心 眼科学期刊分区表				
序号	刊名	ISSN	分区	
1	PROGRESS IN RETINAL AND EYE RESEARCH	1350-9462	1区	review
2	OPHTHALMOLOGY	0161-6420	1区	
3	JAMA Ophthalmology	2168-6165	1区	
4	AMERICAN JOURNAL OF OPHTHALMOLOGY	0002-9394	1区	
5	BRITISH JOURNAL OF OPHTHALMOLOGY	0007-1161	1区	
6	Ocular Surface	1542-0124	1区	
7	Eye and Vision	2326-0254	1区	
8	SURVEY OF OPHTHALMOLOGY	0039-6257	2区	review
9	Annual Review of Vision Science	2374-4642	2区	review
10	RETINA-THE JOURNAL OF RETINAL AND VITREOUS DISEASES	0275-004X	2区	
11	CLINICAL AND EXPERIMENTAL OPHTHALMOLOGY	1442-6404	2区	
12	INVESTIGATIVE OPHTHALMOLOGY & VISUAL SCIENCE	0146-0404	2区	
13	CURRENT OPINION IN OPHTHALMOLOGY	1040-8738	2区	review
14	JOURNAL OF REFRACTIVE SURGERY	1081-597X	2区	
15	JOURNAL OF CATARACT AND REFRACTIVE SURGERY	0886-3350	2区	
16	Contact Lens & Anterior Eye	1367-0484	2区	
17	Asia-Pacific Journal of Ophthalmology	2162-0989	2区	
18	OPHTHALMIC AND PHYSIOLOGICAL OPTICS	0275-5408	2区	
19	EXPERIMENTAL EYE RESEARCH	0014-4835	2区	
20	Ophthalmology and Therapy	2193-8245	3区	
21	OPHTHALMOLOGICA	0030-3755	3区	
22	ACTA OPHTHALMOLOGICA	1755-375X	3区	
23	EYE	0950-222X	3区	
24	CORNEA	0277-3740	3区	
25	VISION RESEARCH	0042-6989	3区	
26	Eye & Contact Lens-Science and Clinical Practice	1542-2321	3区	
27	GRAEFES ARCHIVE FOR CLINICAL AND EXPERIMENTAL OPHTHALMOLOGY	0721-832X	3区	
28	OPHTHALMIC RESEARCH	0030-3747	3区	
29	Translational Vision Science & Technology	2164-2591	3区	
30	JOURNAL OF GLAUCOMA	1057-0829	3区	
31	JOURNAL OF NEURO-OPHTHALMOLOGY	1070-8022	3区	
32	JOURNAL OF VISION	1534-7362	3区	
33	OCULAR IMMUNOLOGY AND INFLAMMATION	0927-3948	3区	
34	OPHTHALMIC PLASTIC AND RECONSTRUCTIVE SURGERY	0740-9303	3区	
35	International Journal of Ophthalmology	2222-3959	3区	
36	MOLECULAR VISION	1090-0535	4区	
37	Clinical and Experimental Optometry	0816-4622	4区	
38	Seminars in Ophthalmology	0882-0538	4区	
39	JAPANESE JOURNAL OF OPHTHALMOLOGY	0021-5155	4区	
40	CURRENT EYE RESEARCH	0271-3683	4区	
41	JOURNAL OF OCULAR PHARMACOLOGY AND THERAPEUTICS	1080-7683	4区	
42	BMC Ophthalmology	1471-2415	4区	
43	CANADIAN JOURNAL OF OPHTHALMOLOGY-JOURNAL CANADIEN D OPHTHALMOLOGIE	0008-4182	4区	
44	VISUAL NEUROSCIENCE	0952-5238	4区	
45	INTERNATIONAL OPHTHALMOLOGY	0165-5701	4区	
46	OPHTHALMIC EPIDEMIOLOGY	0928-6586	4区	
47	Journal of Ophthalmology	2090-004X	4区	
48	Cutaneous and Ocular Toxicology	1556-9527	4区	
49	INDIAN JOURNAL OF OPHTHALMOLOGY	0301-4738	4区	
50	DOCUMENTA OPHTHALMOLOGICA	0012-4486	4区	
51	OPTOMETRY AND VISION SCIENCE	1040-5488	4区	
52	EUROPEAN JOURNAL OF OPHTHALMOLOGY	1120-6721	4区	
53	PERCEPTION	0301-0066	4区	
54	JOURNAL OF PEDIATRIC OPHTHALMOLOGY & STRABISMUS	0191-3913	4区	
55	Journal of Eye Movement Research	1995-8692	4区	
56	JOURNAL OF AAPOS	1091-8531	4区	
57	Ophthalmic Surgery Lasers & Imaging Retina	2325-8160	4区	
58	OPHTHALMIC GENETICS	1381-6810	4区	
59	OPHTHALMOLOGE	0941-293X	4区	
60	ARQUIVOS BRASILEIROS DE OFTALMOLOGIA	0004-2749	4区	
61	JOURNAL FRANCAIS D OPHTALMOLOGIE	0007-5512	4区	
62	KLINISCHE MONATSBLETTER FUR AUGENHEILKUNDE	0023-2165	4区	

引自 Eye and Vision。