

# 角膜高阶像差在临床中的应用

王佳欣<sup>1</sup>, 邓雅婷<sup>1</sup>, 唐琼燕<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>暨南大学附属爱尔眼科医院, 广东 广州

<sup>2</sup>长沙爱尔眼科医院, 湖南 长沙

收稿日期: 2023年12月15日; 录用日期: 2024年1月9日; 发布日期: 2024年1月16日

## 摘要

角膜高阶像差(corneal higher-order aberration, HOA), 是由于角膜的非理想球面产生的一种不能被框架眼镜矫正的复杂光学畸变, 可导致患者的视觉质量下降。目前, 角膜HOA已广泛应用于屈光性手术中的个性化设计和术后的随访评估, 以及为一些角膜疾病的诊断与严重程度评估提供思路。本文就目前角膜HOA在临床中的应用作一综述, 以期临床精准诊疗提供新思路。

## 关键词

角膜, 高阶像差, 临床应用

# Application of Corneal Higher-Order Aberrations in Clinical Practices

Jiaxin Wang<sup>1</sup>, Yating Deng<sup>1</sup>, Qiongyan Tang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Aier Eye Hospital, Jinan University, Guangzhou Guangdong

<sup>2</sup>Changsha Aier Eye Hospital, Changsha Hunan

Received: Dec. 15<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 9<sup>th</sup>, 2024; published: Jan. 16<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The corneal higher order aberration (HOA) is complex optical aberrations caused by the non-ideal sphere of the cornea that cannot be corrected by frame glasses, resulting in reduced visual quality. At present, corneal HOA has been applied in the personalized design and postoperative follow-up evaluation of refractive surgery, as well as the auxiliary diagnosis and severity evaluation of some corneal diseases. This paper reviews the current clinical application of corneal HOA, hoping to provide new ideas for clinical diagnosis and treatment.

## Keywords

### Cornea, Higher-Order Aberrations, Clinical Application

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

19 世纪, Helmholtz 发现了用现有光学理论无法纠正的光学误差, 这些被称为高阶像差(higher-order aberration, HOA)。近年来, 随着各类屈光性手术的发展和眼科高精设备不断涌现, 我们开始认识到高阶像差对人眼视觉质量有显著影响, 如眩光、光晕及夜间视力下降等问题。部分学者认为大约 90% 的眼像差是由角膜畸变引起的[1] [2]。McLellan JS [3]早在 2001 年就证实了, 随着年龄增长, 全眼彗差变化的主要来源是角膜彗差的增加。目前, 角膜高阶像差(HOA)不仅在术前评估、术中手术方案设计和术后视觉效果预测方面具有重要作用, 还逐渐成为一些角膜疾病的辅助诊断工具。因此, 本文将对角膜高阶像差的研究进展和临床应用进行综述。

## 2. 角膜高阶像差的定义

当光学系统出射波面变形时, 实际的波前为不规则球面, 此时与理想波前产生的偏差即为波前像差。人眼并非理想的光学系统, 光线通过角膜时, 由于角膜的非理想形状, 在其前表面和后表面上会产生复杂的光学畸变称为角膜高阶像差。20 世纪引入的 Zernike 多项式可以对此进行定量分析, 包括 7 阶 35 项, 其中三阶以上为高阶像差(如彗差、球差、三叶草差等), 用常规的验光手段无法测量, 且不能被传统的框架眼镜或接触镜所矫正。健康人群各项角膜 HOA 在不同个体间分布范围广泛, 且随着阶数的升高, 均方根(rootmean square, RMS)平均值逐渐降低, 即所占比重逐渐降低。

## 3. 角膜高阶像差的测量

目前关于测量角膜高阶像差的方法或仪器, 尚未有金标准[4]。除波前像差仪外, 还可采用 Pentacam 或 AS-OCT 来测量角膜像差。Pentacam 是一种使用旋转 Scheimpflug 相机的非侵入性前段断层扫描仪, 能够对角膜、前房和晶状体进行成像。AS-OCT 则是利用光学相干断层扫描(OCT)原理, 在不接触眼睛的情况下得到角膜的详细图像。此外, iTrace 和 OPD ScanIII 也可用于测量全眼像差, 并将其区分为角膜像差和眼内像差。OPD ScanIII 是通过 Placido 环图像投射到角膜上进行地形测量, 并使用 Zernike 多项式进行波前像差分析。iTrace 使用射线追踪技术, 将多个点源光束发送到眼睛中, 并通过检测这些光束在眼球中的传播路径和偏折情况, 来计算出眼球的光学参数和像差。关于不同设备检测结果的一致性和准确性目前还没有统一的定论[5]。每种设备都有其特定的测量原理和技术, 因此可能会导致结果之间的差异。

## 4. 角膜高阶像差在临床中的应用

随着对角膜高阶像差的深入研究, 其应用范围也逐渐扩大, 除了用作各类屈光性手术术前筛查、手术方案的设计及术后视觉质量评估外, 也开始作为一些角膜疾病的辅助诊断, 尤其对圆锥角膜的早期筛查有重要价值。

## 4.1. 屈光矫正的个性化设计及视觉质量评估

随着技术的不断进步,角膜屈光手术逐渐多样化。然而,激光屈光手术可能会导致严重的视觉障碍,包括复视、眩光、光晕和对比敏感度下降等症状,这些都是由角膜产生的高阶像差引起的[6] [7] [8] [9]。角膜 HOA 可以作为术前的一项重要参考指标,以尽可能减少术中 HOA 的引入,确保患者术后良好的视觉效果。

### 4.1.1. 经上皮激光屈光性角膜切削术(Transepithelial Laser Refractive Keratectomy, T-PRK)

近年来, T-PRK 被重新引入作为传统 PRK 的替代方法。现已可以用 T-PRK 结合角膜地形图或像差引导的个性化设计,来纠正术前不规则散光或较大的高阶像差。主要有两种方法,波前优化(Wavefront optimization, WFO)和角膜波前引导(Corneal wavefront guidance, CWFG)被用于减少术后 HOA 的产生。这两种情况都减少了全眼 HOA 和眩光症状,但两组术后角膜 RMS HOA 均升高[10]。Ting Shao 等人的研究表示[11], CWFG 组和 WFO 组术后角膜 HOA 均有所增加,而在术后 3 个月和 6 个月, CWFG 组的角膜 HOA 明显小于 WFO 组,前者可能会有更好的视觉质量。CWFG 在矫正彗差方面具有优势。他们还表示,当术前患者的角膜 HOA 较小时,可能很难识别治疗方案之间的细微差异,对于 HOA 偏大的患者推荐选用 CWFG 技术。Jun I 等人[10]通过对比研究发现,对于中度到高度散光(-1.75 至-10D)的患者, CWFG 的疗效比 WFO 更好, CWFG 组术后 6 个月 RMS HOA 明显小于 WFO 组。因此,可以根据 HOA 的大小来选择手术方法,并对术后视觉质量进行客观评价。

### 4.1.2. 飞秒激光辅助原位角膜磨镶术(Femtosecond Laser Assisted *in Situ* Keratomileusis, FS-LASIK)与小切口透镜取出术(Small Incision Lens Extraction, SMILE)

自 2003 年以来,飞秒激光已被应用于 LASIK 中创建角膜瓣,由于其可预测性高且角膜愈合反应比准分子激光更温和,成为许多患者的第一选择。Wang J [12]等人通过对 FS-LASIK 患者术后一年的随访证实球差和彗差是影响术后视觉质量的重要因素,且角膜 HOA 的改变主要发生在角膜前表面。Wu Y 等人证实了[6] FS-LASIK 术后角膜像差的变化与角膜非球面度的变化有关; Li N [13]等人对散光人群进行分析后也发现,散光度数越高,需要切削的周边角膜越深,这种形态学上的改变导致通过周边角膜的光线比中央角膜更早聚焦,从而引起 Q 值的较大变化及术后角膜像差的增加。他们均表示在选择屈光手术患者时应考虑这一点。Jin HY [14]还提出术后角膜 HOA 的产生与术前 SE 有关, Feng Z 等人对行 FS-LASIK 术的高度近视患者进行分析后发现,术后角膜 HOA 的增加程度与切削深度明显相关[9]。目前基于角膜地形图引导下 FS-LASIK 可根据不同患者术前角膜形态进行个性化手术设计,尽可能避免或减少术后高阶像差的引入。

SMILE 术则通过一个 2~5 mm 的切口去除屈光不正,可以避免角膜瓣引起的像差。Wu [15]等人统计了 SMILE 术后的角膜 HOA 发现,术后角膜表面总 HOA 值与术前相似。Xia F [16]等人对 SMILE 术后患者进行了为期 7 年的随访后也发现,角膜球差、三叶草差及总 HOA 值均无显著变化。然而, Jin HY 等人发现[14], SMILE 术后,前角膜和全角膜的高阶像差,特别是球差和垂直彗差明显增加,而角膜后表面 HOA 保持相对不变。He X 等人[17]发现,与 FSLASIK 角膜瓣相比, SMILE 角膜瓣具有更好的均匀性和对称性。这种形态特征与术后角膜 HOA 的变化密切相关,尤其是 SA 和昏迷。由此可见,角膜帽/瓣的质量对于追求 FS-LASIK 或 SMILE 手术的良好结果的重要性。

### 4.1.3. 角膜接触镜

角膜塑形镜(Corneal refractive therapy, CRT)是一种成功的矫正近视的方法。它提供了一种非生理性的扁圆形角膜,先前的研究中已经充分证明,这种角膜形状的变化会导致光学质量下降,主要是球差、水

平和垂直彗差的改变,从而导致视觉质量下降[18]。与屈光手术相比,两者都会导致角膜 HOA 增加,但 CRT 明显会产生更大的球差。然而,CRT 在屈光、视力、角膜曲率等方面是可逆的,停止配戴 1 个月后,角膜彗差、三叶草差和四叶草差的 RMS 完全恢复到初始水平,球差恢复所需要的时间相对更长。Tomiyama ES 等人[19]认为球差的变化可能是由于中周变陡导致角膜重塑所致,而彗差的变化则是由于塑形镜佩戴偏心所致。

另外,还有一种夜间角膜塑形镜通过使用透气性材料制造的透镜来塑造角膜,以暂时减少近视。该方法在成人中已被证明会增加角膜总 HOA,从而使对比敏感度下降,但与患者满意度无明显相关性。Chang CF 等人[20]对已佩戴 OK 镜 28 天的儿童角膜形态进行测量后发现,角膜总 HOA 显著增加,对比敏感度降低。因此,对于长期配戴角膜接触镜的患者,角膜 HOA 的增大为其视觉质量下降提供了合理的解释。

## 4.2. 眼表疾病的辅助诊断和严重程度评估

角膜 HOA 值被认为是角膜不规则散光的重要定量指标。临床上已经对各种角膜和眼表疾病的角膜 HOA 进行了评估和分析[21],不仅在圆锥角膜中,在干眼患者以及其他疾病所致角膜混浊中也应用广泛。

### 4.2.1. 圆锥角膜(Keratoconus KC)

圆锥角膜早期阶段是无症状的。角膜突出随着疾病的进展变得明显,导致严重近视和不规则散光。目前,Scheimpflug 成像是圆锥角膜的一种重要诊断方法。Alió JL [22]早在 2006 年提出用彗差大小对早期圆锥角膜作出诊断(区分健康和 1 期圆锥角膜)并进行分类。随着测量设备的迭代,角膜 HOA 开始被用于 KC 分类的临床和亚临床鉴别。Nadalia、Xu 等人[23] [24]证实角膜 HOA 值与 KC 疾病的严重程度相关,并指出后表面像差对区分正常角膜和早期 KC 角膜的重要性。健康组后表面垂直彗差值分别为  $0.032 \pm 0.363$ 、 $-0.008 \pm 0.049$ ,早期 KC 组分别为  $0.193 \pm 0.264$ 、 $0.112 \pm 0.103$ ,两组之间存在统计学显著差异。Castro-Luna G 等人[25]注意到,在健康患者中,角膜前表面垂直彗差为  $0.01 \pm 0.20$ ,后表面垂直彗差为  $-0.01 \pm 0.05$ ,在亚临床圆锥角膜中,分别为  $-0.49 \pm 0.43$ 、 $0.11 \pm 0.10$ 。可见圆锥角膜早期出现角膜病变时,前后表面垂直彗差均增大,但变化方向相反。Ortiz-Toquero S 等人[26]对前角膜 HOA 在圆锥角膜分类中的有效性进行交叉验证后也得出类似结论,前角膜的高阶像差(特别是彗差和其他三阶像差)可用于圆锥角膜的早期检测和分类中。在区分圆锥角膜眼和正常眼时,三阶 RMS 的临界值为  $0.362 \mu\text{m}$ 。总之,利用角膜 HOA 值进行判别分析,可以检测到基于 Placido 地形分析无法检测到的早期亚临床圆锥角膜。此外,由于圆锥角膜患者亲属中圆锥角膜和圆锥角膜疑似患者的患病率较高,Namdari M 等人[27]在对其一级亲属进行调查分析后发现,圆锥角膜家族成员的角膜 HOA 显著高于对照组。以上研究表明,角膜 HOA 对圆锥角膜早期的诊断和鉴别诊断具有重要参考意义。

### 4.2.2. Fuchs 角膜内皮营养不良

Fuchs 角膜内皮营养不良是一种双侧缓慢进展的角膜疾病,其特征是角膜基质增厚,弥漫性上皮水肿和视力下降。Bolac R 等人[28]证实了该类患者角膜前表面高阶像差的增加,且与视力相关。Wacker K [29]等人认为即使在 FECD 的早期阶段,角膜前后的 HOA 均高于正常水平,视力也会下降,FECD 的早期前角膜异常很重要。

### 4.2.3. 其他角膜炎

感染性角膜炎临床表现为角膜上皮缺损和基质浸润,由此产生的角膜混浊和不规则散光使患者预后效果较差。Matsumura T 等人[21]证实了,在感染性角膜炎后患者的总角膜 HOA、前角膜 HOA 和后角膜 HOA 均大于健康人群,但会随着抗菌治疗后感染的消退而减少,HOA 的降低与视力改善显著相关。同



时对真菌性角膜炎(fungal keratitis, FK)、棘阿米巴性角膜炎(*Acanthamoeba keratitis*, AK)和细菌性角膜炎(bacterial keratitis, BK)三种类型的角膜炎进行对比分析后发现,FK 的治疗后总角膜和前角膜 HOA 显著大于 AK, FK 的后角膜 HOA 显著大于 BK。以上均表明角膜 HOA 反映了感染性角膜炎的严重程度和治疗过程中的变化,同时可作为视觉功能的客观指标。

泡性角膜炎是一种局限性、非感染性的眼表炎症性疾病,以角膜结节和新生血管形成为特征。Katayama T [30]等人研究发现,所有泡性角膜炎的患者角膜 HOA 值都有显著增加,但用皮质类固醇滴眼液后的患者角膜 HOA 与健康人无显著差异。因此在角膜急性炎症早期需要进行适当干预治疗,以避免因角膜 HOA 增加所导致的并发症发生。除此之外,角膜 HOA 可作为泡性角膜炎的客观定量光学参数,在治疗或随访该类患者时,评估角膜 HOA 对疾病的进展和预后是有价值的[30]。

流行性角膜炎通常在 1~3 周内出现上皮浸润。这可能导致视力下降和视力障碍(包括光晕、眩光和畏光等)。Tekin K [31]等人表示持续性角膜上皮浸润的眼睛的总角膜 HOA 值,包括彗差,三叶草差,球差等在统计学上显著不同于正常的对侧眼睛。因此,角膜 HOA 值可以作为一些角膜疾病预后评估的客观指标。

#### 4.2.4. 干眼患者眼表评估

泪膜破裂引起的波前像差变化是导致视网膜图像质量下降的原因之一,干眼患者的波前像差和角膜表面不规则性增加[32]。Liu RJ 等人[33]测量总角膜像差、彗差、三叶草差和球差后发现,干眼患者均显著高于健康人群,尤其是三叶草差对干眼的诊断有较好的敏感性和特异性。其中,泪膜破裂时间与彗差、三叶草、球差呈高度负相关,与角膜总 HOA 呈中度负相关。说明泪膜的稳定性对视觉质量起着重要的作用。Teshigawara T 等人[34]收集了使用瑞巴派特滴眼液改善眼表情况的患者数据后发现,治疗后的角膜 HOA 明显低于治疗前,且治疗前较大的 HOA 降低幅度更大。Lu N [32]等人统计了干眼患者在使用人工泪液治疗两周后,中央角膜表面的 HOA 显著改善,干眼症状有所缓解,视觉质量也有提高。Gao Y 等人[35]也表示干眼患者在使用氟米龙和玻璃酸钠滴眼液治疗前后角膜总 HOA 值有明显差异。因此,角膜 HOA 测量对于干眼症的诊断具有重要作用,且可以作为其疗效评价的关键指标。

### 4.3. 手术疗效的评估及术后随访

#### 4.3.1. 角膜胶原蛋白交联术(Corneal Collagen Cross-Linking, CXL)

CXL 是一种微创的方法,一直被用于防止圆锥角膜的进展,仅适用于早期至中度 KC [36]。El-Massry AA 等人[37]发现用 CXL 矫正后角膜 HOA 降低,主要是彗差的减少,这可能会加速术后视力的恢复。R. C. Ghanem [38]等对 CXL 术后 2 年的患者随访,其角膜总 HOA 显著降低。Besek NK [39]等人也证明,CXL 术后角膜三叶草差、彗差和球差减少。且相比旁中央病变的患者,中央区变薄的患者球差改善更多,疗效更为显著。

#### 4.3.2. 角膜移植术

角膜内皮移植术主要包括后弹力层剥脱式自动内皮角膜移植术(Descemet stripping automated endothelial keratoplasty, DSAEK)和后弹力层角膜内皮移植术(Descemet membrane endothelial keratoplasty, DMEK)两种。有研究表明,DMEK 术后角膜后表面 HOA 明显比 DSAEK 低,而视觉功能方面则优于 DSAEK [40] [41]。Karaca EE [42]等人表示 DMEK 术后角膜 HOA 在立即增加,但在前 3 个月内逐渐减少。Hayashi T [43]等人对 DMEK 术后一年的随访发现,患者尽管获得了良好的视觉功能和清晰度,但接受 DMEK 的眼睛仍然会比正常眼睛有更高的角膜 HOA。因此,角膜 HOA 不仅可以对角膜内皮移植术的手术疗效进行评估,而且对术后随访且评估患者预后也有一定的价值。

### 4.3.3. 白内障手术

随着屈光性白内障理念的普及, 确保改善患者全程视力的同时也能获得较好的视觉质量成为眼科医生的目标。由此, 角膜的光学特性开始被广泛关注。Cervantes-Coste, G 最新一项研究表明[44], 术前角膜 HOA 与术后最佳矫正视力(corrected distance visual acuities, CDVA)之间存在显著相关性; 其中总彗差值与患者术后中近视力呈负相关, 因此术前光学像差筛查可能有助于多焦点 IOL 植入前的患者选择。2019 年中国多焦点人工晶状体临床应用专家共识[45]也提出, 术前角膜中央直径 4 mm 区域总高阶像差  $< 0.3 \mu\text{m}$  的患者可推荐植入 MIOL (Multifocal Intraocular lens), 超出此范围的患者谨慎植入,  $>0.5 \mu\text{m}$  不建议植入 MIOL。对于植入 Toric IOL 的患者, Hwang HB [46]等人证实如果术后的残余散光大于预期, 则术前的角膜 HOA, 特别是垂直彗差较高。

另外, Eliwa TF 等人认为[47], 术后光学质量与术中切口大小有关, 通过减小切口尺寸, 可以最大限度地减少手术产生的角膜 HOA, 2 毫米似乎是人类角膜手术不会引起光学变化的极限。飞秒激光手术切口稳定, 对 HOA 无明显影响。对于术后视觉质量较差的患者, Reinstein 等人[48]认为, TGL 是改善视觉质量的有效手段, 可显著降低角膜 HoA。Shin E 等人研究也证实[49], TGL 可有效降低角膜 HOA, 如球差、彗差和三叶草差等, 并改善远距离和近距离视力。以上研究均证实, 角膜 HOA 不仅可以用于白内障术前患者的筛选, 还对术中切口的设计及术后的视觉质量评估有重要参考价值。

## 5. 小结

综上所述, 角膜 HOA 的定量分析已成为屈光性手术及角膜疾病诊疗过程的重要组成部分。这种客观、可重复的定量测量方法在常规临床和实验研究中非常有必要。但由于角膜 HOA 受多种因素的影响, 尤其是泪膜稳定性, 常常会引起较大的测量误差, 因此它在临床中的应用和推广还有待进一步探索。随着眼科屈光技术及计算机软件设计的发展, 角膜高阶像差将逐渐成为临床上广泛应用的评估相关疾病严重程度及治疗效果的有效指标。

## 参考文献

- [1] Karimian, F., Feizi, S. and Doozande, A. (2010) Higher-Order Aberrations in Myopic Eyes. *Journal of Ophthalmic and Vision Research*, **5**, 3-9. (Published Correction Appears in *J Ophthalmic Vis Res*, 2010 Jul, 5(3): 214)
- [2] Zhou, S., Chen, X., Ortega-Usobiaga, J., *et al.* (2023) Characteristics and Influencing Factors of Corneal Higher-Order Aberrations in Patients with Cataract. *BMC Ophthalmology*, **23**, Article No. 313. <https://doi.org/10.1186/s12886-023-03067-0>
- [3] McLellan, J.S., Marcos, S. and Burns, S.A. (2001) Age-Related Changes in Monochromatic Wave Aberrations of the Human Eye. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **42**, 1390-1395.
- [4] Cade, F., Cruzat, A., Paschalis, E., Santo, L. and Pineda, R. (2013) Analysis of Four Aberrometers for Evaluating Lower and Higher Order Aberrations. *PLOS ONE*, **8**, e54990. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0054990>
- [5] Ning, R., Gao, R., Piñero, D.P., *et al.* (2022) Repeatability and Reproducibility of Corneal Higher-Order Aberrations Measurements after Small Incision Lenticule Extraction Using the Scheimpflug-Placido Topographer. *Eye and Vision (Lond)*, **9**, Article No. 1. <https://doi.org/10.1186/s40662-021-00274-y>
- [6] Wu, Y., Wang, S., Wang, G., Zhao, S., Wei, R. and Huang, Y. (2021) Corneal Asphericity and Higher-Order Aberrations after FS-LASIK and Trans-PRK for Myopia. *Journal of Ophthalmology*, **2021**, Article ID: 3765046. <https://doi.org/10.1155/2021/3765046>
- [7] Zheng, Z., Zhang, M., Jhanji, V., *et al.* (2021) Comparison between Aberration-Free Transepithelial Photorefractive Keratectomy and Small Incision Lenticule Extraction for Correction of Myopia and Myopic Astigmatism. *International Ophthalmology*, **41**, 303-314. <https://doi.org/10.1007/s10792-020-01582-3>
- [8] Lee, K., Ahn, J.M., Kim, E.K., *et al.* (2013) Comparison of Optical Quality Parameters and Ocular Aberrations after Wavefront-Guided Laser *In-Situ* Keratomileusis versus Wavefront-Guided Laser Epithelial Keratomileusis for Myopia. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, **251**, 2163-2169. <https://doi.org/10.1007/s00417-013-2356-x>

- [9] Feng, Z., Wang, Q., Du, C., Yang, F. and Li, X. (2021) High-Order Aberration Changes after Femtosecond LASIK Surgery in Patients with High Myopia. *Annals of Palliative Medicine*, **10**, 7689-7696. <https://doi.org/10.21037/apm-21-1677>
- [10] Jun, I., Kang, D.S.Y., Arba-Mosquera, S., *et al.* (2018) Comparison between Wavefront-Optimized and Corneal Wavefront-Guided Transepithelial Photorefractive Keratectomy in Moderate to High Astigmatism. *BMC Ophthalmology*, **18**, Article No. 154. <https://doi.org/10.1186/s12886-018-0827-x>
- [11] Shao, T., Li, H., Zhang, J., Wang, H., Liu, S. and Long, K. (2022) Comparison of Wavefront-Optimized and Corneal Wavefront-Guided transPRK for High-Order Aberrations (>0.35  $\mu\text{m}$ ) in Myopia. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, **48**, 1413-1418. <https://doi.org/10.1097/j.jcrs.0000000000001012>
- [12] Wang, J., Ren, Y., Liang, K., Jiang, Z. and Tao, L. (2018) Changes of Corneal High-Order Aberrations after Femtosecond Laser-Assisted *In Situ* Keratomileusis. *Medicine (Baltimore)*, **97**, e0618. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000010618>
- [13] Li, N., Chen, T., Tian, G., *et al.* (2023) Changes in Aberrations and Biomechanics after Femtosecond Laser-Assisted Laser *in Situ* Keratomileusis (FS-LASIK) in Eyes with High Astigmatism: A Retrospective Case Control Study. *BMC Ophthalmology*, **23**, Article No. 62. <https://doi.org/10.1186/s12886-023-02809-4>
- [14] Jin, H.Y., Wan, T., Yu, X.N., Wu, F. and Yao, K. (2018) Corneal Higher-Order Aberrations of the Anterior Surface, Posterior Surface, and Total Cornea after Small Incision Lenticule Extraction (SMILE), High Myopia versus Mild to Moderate Myopia. *BMC Ophthalmology*, **18**, Article No. 295. <https://doi.org/10.1186/s12886-018-0965-1>
- [15] Wu, W. and Wang, Y. (2016) Corneal Higher-Order Aberrations of the Anterior Surface, Posterior Surface, and Total Cornea after SMILE, FS-LASIK, and FLE<sub>X</sub> Surgeries. *Eye & Contact Lens: Science & Clinical Practice*, **42**, 358-365. <https://doi.org/10.1097/ICL.0000000000000225>
- [16] Xia, F., Shen, Y., Han, T., Zhao, J., Xu, H. and Zhou, X. (2020) Small Incision Lenticule Extraction (SMILE) for Moderate and High Myopia: Seven-Year Outcomes of Refraction, Corneal Tomography, and Wavefront Aberrations. *Journal of Ophthalmology*, **2020**, Article ID: 3825864. <https://doi.org/10.1155/2020/3825864>
- [17] He, X., He, Q., Yuan, M., *et al.* (2022) Evaluation of Morphological Features: Femtosecond-LASIK Flap vs. SMILE Cap, and the Effects on Corneal Higher-Order Aberrations. *Graefes' Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, **260**, 3993-4003. <https://doi.org/10.1007/s00417-022-05841-0>
- [18] Lorente-Velázquez, A., Nieto-Bona, A., Collar, C.V., *et al.* (2011) Straylight and Contrast Sensitivity after Corneal Refractive Therapy. *Optometry and Vision Science*, **88**, 1245-1251. <https://doi.org/10.1097/OPX.0b013e3182271449>
- [19] Tomiyama, E.S., Hu, C., Marsack, J.D. and Richdale, K. (2021) Greater Higher Order Aberrations Induced by Toric Orthokeratology versus Soft Toric Multifocal Contact Lens Wear. *Ophthalmic and Physiological Optics*, **41**, 726-735. <https://doi.org/10.1111/opo.12839>
- [20] Chang, C.F. and Cheng, H.C. (2020) Effect of Orthokeratology Lens on Contrast Sensitivity Function and High-Order Aberrations in Children and Adults. *Eye & Contact Lens: Science & Clinical Practice*, **46**, 375-380. <https://doi.org/10.1097/ICL.0000000000000667>
- [21] Matsumura, T., Yamaguchi, T., Suzuki, T., *et al.* (2023) Changes in Corneal Higher-Order Aberrations during Treatment for Infectious Keratitis. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 848. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28145-7>
- [22] Alió, J.L. and Shabayek, M.H. (2006) Corneal Higher Order Aberrations: A Method to Grade Keratoconus. *Journal of Refractive Surgery*, **22**, 539-545. <https://doi.org/10.3928/1081-597X-20060601-05>
- [23] Naderan, M., Jahanrad, A. and Farjadnia, M. (2018) Ocular, Corneal, and Internal Aberrations in Eyes with Keratoconus, Forme Fruste Keratoconus, and Healthy Eyes. *International Ophthalmology*, **38**, 1565-1573. <https://doi.org/10.1007/s10792-017-0620-5>
- [24] Xu, Z., Li, W., Jiang, J., Zhuang, X., Chen, W., Peng, M., Wang, J., Lu, F., Shen, M. and Wang, Y. (2017) Characteristic of Entire Corneal Topography and Tomography for the Detection of Sub-Clinical Keratoconus with Zernike Polynomials Using Pentacam. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 16486. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16568-y>
- [25] Castro-Luna, G. and Pérez-Rueda, A. (2020) A Predictive Model for Early Diagnosis of Keratoconus. *BMC Ophthalmology*, **20**, Article No. 263. <https://doi.org/10.1186/s12886-020-01531-9>
- [26] Ortiz-Toquero, S., Fernandez, I. and Martin, R. (2020) Classification of Keratoconus Based on Anterior Corneal High-Order Aberrations: A Cross-Validation Study. *Optometry and Vision Science*, **97**, 169-177. <https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000001489>
- [27] Namdari, M., Eslampour, A. and Zarei-Ghanavati, S. (2023) Evaluation of Ocular Higher-Order Aberrations in First-Degree Relatives of Patients with Keratoconus. *Cornea*, **42**, 308-312. <https://doi.org/10.1097/ICO.0000000000003055>
- [28] Bolac, R., Yıldız, E. and Balci, S. (2023) Anterior Corneal High-Order Aberrations in Fuchs' Endothelial Corneal Dystrophy Classified by Scheimpflug Tomography. *Optometry and Vision Science*, **100**, 151-157.

- <https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000001981>
- [29] Wacker, K., McLaren, J.W., Amin, S.R., Baratz, K.H. and Patel, S.V. (2015) Corneal High-Order Aberrations and Backscatter in Fuchs' Endothelial Corneal Dystrophy. *Ophthalmology*, **122**, 1645-1652. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2015.05.005>
- [30] Katayama, T., Yagi-Yaguchi, Y., Ibrahim, O., Shimazaki, J. and Yamaguchi, T. (2020) Corneal Higher-Order Aberrations in Phlyctenular Keratitis. *Japanese Journal of Ophthalmology*, **64**, 478-484. <https://doi.org/10.1007/s10384-020-00759-8>
- [31] Tekin, K., Kiziloprak, H., Koc, M., Goker, Y.S., Kocer, A.M. and Yilmazbas, P. (2019) The Effect of Corneal Infiltrates on Densitometry and Higher-Order Aberrations. *Clinical and Experimental Optometry*, **102**, 140-146. <https://doi.org/10.1111/cxo.12828>
- [32] Lu, N., Lin, F., Huang, Z., He, Q. and Han, W. (2016) Changes of Corneal Wavefront Aberrations in Dry Eye Patients after Treatment with Artificial Lubricant Drops. *Journal of Ophthalmology*, **2016**, Article ID: 1342056. <https://doi.org/10.1155/2016/1342056>
- [33] Liu, R.J., Ma, B.K., Gao, Y.F., Liu, Y.Y. and Qi, H. (2022) Evaluations of Wavefront Aberrations and Corneal Surface Regularity in Dry Eye Patients Measured with OPD Scan III. *International Journal of Ophthalmology*, **15**, 407-412. <https://doi.org/10.18240/ijo.2022.03.06>
- [34] Teshigawara, T., Meguro, A. and Mizuki, N. (2021) Effects of Rebamipide on Differences in Power and Axis of Corneal Astigmatism between Two Intra-patient Keratometric Measurements in Dry Eyes. *Ophthalmology and Therapy*, **10**, 891-904. <https://doi.org/10.1007/s40123-021-00368-9>
- [35] Gao, Y., Liu, R., Liu, Y., et al. (2021) Optical Quality in Patients with Dry Eye before and after Treatment. *Clinical and Experimental Optometry*, **104**, 101-106. <https://doi.org/10.1111/cxo.13111>
- [36] Tasci, Y.Y., Uzel, A.G.T., Eyidogan, D., Sarac, O. and Cagil, N. (2020) Keratokonus hastalarına uygulanan standart kollajen çapraz bağlama tedavisinin beş yıllık uzun dönem sonuçları. *Turkish Journal of Ophthalmology*, **50**, 200-205.
- [37] El-Massry, A.A., Dowidar, A.M., Massoud, T.H. and Tadros, B.G.D. (2017) Evaluation of the Effect of Corneal Collagen Cross-Linking for Keratoconus on the Ocular Higher-Order Aberrations. *Clinical Ophthalmology*, **11**, 1461-1469. <https://doi.org/10.2147/OPHTH.S142167>
- [38] Ghanem, R.C., Santhiago, M.R., Berti, T., Netto, M.V. and Ghanem, V.C. (2014) Topographic, Corneal Wavefront, and Refractive Outcomes 2 Years after Collagen Crosslinking for Progressive Keratoconus. *Cornea*, **33**, 43-48. <https://doi.org/10.1097/ICO.0b013e3182a9fbdf>
- [39] Besek, N.K., Yalcinkaya, G., Kirgiz, A., et al. (2021) The Effect of Cone Localization on Higher Order Aberrations after Corneal Crosslinking for Keratoconus. *Beyoglu Eye Journal*, **6**, 206-211. <https://doi.org/10.14744/bej.2021.07088>
- [40] Waldrop, W.H., Gillings, M.J., Robertson, D.M., Petroll, W.M. and Mootha, V.V. (2020) Lower Corneal Haze and Aberrations in Descemet Membrane Endothelial Keratoplasty versus Descemet Stripping Automated Endothelial Keratoplasty in Fellow Eyes for Fuchs Endothelial Corneal Dystrophy. *Cornea*, **39**, 1227-1234. <https://doi.org/10.1097/ICO.0000000000002416>
- [41] Duggan, M.J., Rose-Nussbaumer, J., Lin, C.C., Austin, A., Labadzincki, P.C. and Chamberlain, W.D. (2019) Corneal Higher-Order Aberrations in Descemet Membrane Endothelial Keratoplasty versus Ultrathin DSAEK in the Descemet Endothelial Thickness Comparison Trial: A Randomized Clinical Trial. *Ophthalmology*, **126**, 946-957. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2019.02.007>
- [42] Karaca, E.E., Işık, F.D. and Kemer, Ö.E. (2023) Optical Quality of the Cornea after Descemet Membrane Endothelial Keratoplasty Surgery: Early Results from Türkiye. *Korean Journal of Transplantation*, **37**, 203-209. <https://doi.org/10.4285/kjt.23.0032>
- [43] Hayashi, T., Kobayashi, A., Takahashi, H., Oyakawa, I., Kato, N. and Yamaguchi, T. (2020) Optical Characteristics after Descemet Membrane Endothelial Keratoplasty: 1-Year Results. *PLOS ONE*, **15**, e0240458. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240458>
- [44] Cervantes-Coste, G., Tapia, A., Corredor-Ortega, C., Osorio, M., Valdez, R., Massaro, M., Velasco-Barona, C. and Gonzalez-Salinas, R. (2022) The Influence of Angle Alpha, Angle Kappa, and Optical Aberrations on Visual Outcomes after the Implantation of a High-Addition Trifocal IOL. *Journal of Clinical Medicine*, **11**, Article 896. <https://doi.org/10.3390/jcm11030896>
- [45] 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.
- [46] Hwang, H.B., Kim, H.S., Kim, M.S. and Kim, E.C. (2019) The Effect of Corneal Higher Order Aberrations on Post-operative Residual Astigmatism after Toric IOL Implantation. *Seminars in Ophthalmology*, **34**, 138-145. <https://doi.org/10.1080/08820538.2019.1607399>



- 
- [47] Eliwa, T.F., Elsamkary, M.A. and Hamza, I. (2015) Effect of Biaxial versus Coaxial Microincision Cataract Surgery on Optical Quality of the Cornea. *Indian Journal of Ophthalmology*, **63**, 487-490.  
<https://doi.org/10.4103/0301-4738.162598>
- [48] Reinstein, D.Z., *et al.* (2018) Incidence and Outcomes of Optical Zone Enlargement and Recentration after Previous Myopic LASIK Bytopography-Guided Custom Ablation. *Journal of Refractive Surgery*, **34**, 121-130.  
<https://doi.org/10.3928/1081597X-20171215-01>
- [49] Shin, E., Yoo, Y.S., Choi, S.H., *et al.* (2020) Clinical Outcomes of Topography-Guided Femtosecond Laser-Assisted *in Situ* Keratomileusis after Multifocal Intraocular Lens Implantation. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 10666.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-67726-8>