

# Phorcides 算法在角膜地形图引导近视手术中的临床效果

赵海峰

**引用:** 赵海峰. Phorcides 算法在角膜地形图引导近视手术中的临床效果. 国际眼科杂志, 2026,26(9):1644-1650.

**基金项目:** 宜春市科技局科研课题 (No.JXYC2025KSA183)  
**作者单位:** (336000) 中国江西省宜春市, 宜春爱尔眼科医院  
**作者简介:** 赵海峰, 硕士, 副主任医师, 研究方向: 屈光手术。  
**通讯作者:** 赵海峰. 413261330@qq.com  
**收稿日期:** 2026-03-17      **修回日期:** 2026-07-27

## 摘要

**目的:** 评估 Phorcides 算法联合 Contoura Vision 系统在角膜地形图引导近视矫正术中的有效性与安全性, 并与传统波前优化 (WFO) 模式对比。

**方法:** 采用单中心开放标签试验, 纳入 2024 年 6 月至 2024 年 12 月接受近视矫正手术的患者, 根据患者接受的手术类型自然分组, Phorcides 算法联合角膜地形图引导为 Phorcides 组, 传统波前优化治疗为 WFO 组。两组均使用 WaveLight EX500 准分子激光平台, Phorcides 组基于 Topolyzer Vario 地形图数据, 通过 Phorcides 软件生成个体化切削参数; WFO 组采用标准化波前优化方案。主要观察指标为术后 3 mo 裸眼远视力 (UDVA)、最佳矫正远视力 (CDVA)、残余等效球镜度 (MRSE)、高阶像差 (总 HOAs、含球差 C12、垂直彗差 C7、水平彗差 C8、三叶草差 C6/C9) 及并发症发生率。

**结果:** 本研究纳入患者 128 例 256 眼, 其中 Phorcides 组 64 例 128 眼, WFO 组 64 例 128 眼。Phorcides 组年龄  $28.1 \pm 5.3$  岁, 男 34 例, 女 30 例。WFO 组年龄  $27.9 \pm 5.0$  岁, 男 33 例, 女 31 例。两组年龄、性别、术前 MRSE、术前散光及总 HOAs 比较无差异 (均  $P > 0.05$ )。术后 3 mo, (1) 视力与屈光: Phorcides 组 UDVA  $\geq 20/16$  比例 (65.6%) 显著高于 WFO 组 (37.5%) ( $\chi^2 = 22.18, P < 0.001$ ); Phorcides 组 MRSE 值 ( $-0.07 \pm 0.14$  D) 显著低于 WFO 组 ( $-0.16 \pm 0.21$  D) ( $t = 4.12, P < 0.001$ ), 更接近预期屈光目标; Phorcides 组残余散光  $\leq 0.50$  D 比例 (92.2%) 较 WFO 组 (71.9%) 提升 20.3% ( $\chi^2 = 16.35, P < 0.001$ ); WFO 组仅 1 眼出现 CDVA 损失  $\geq 1$  行, Phorcides 组无 CDVA 下降病例; (2) 高阶像差: Phorcides 组总 HOAs ( $0.37 \pm 0.07 \mu\text{m}$ ) 显著低于 WFO 组 ( $0.51 \pm 0.10 \mu\text{m}$ ) ( $t = 12.84, P < 0.001$ ); Phorcides 组球差 C12 ( $0.21 \pm 0.05 \mu\text{m}$ )、垂直彗差 C7 ( $0.09 \pm 0.02 \mu\text{m}$ ) 及水平彗差 C8 ( $0.08 \pm 0.02 \mu\text{m}$ ) 显著低于 WFO 组 (均  $P < 0.001$ ); 三叶草差 C6 组间无差异 ( $P = 0.056$ ), C9 虽有统计学差异 ( $P = 0.022$ ), 但绝对值微小 ( $< 0.06 \mu\text{m}$ ), 临床意义有限; (3) 并发症: 两组均无严重并发症; Phorcides 组 5 眼 (3.9%) 发生 1 级 DLK, WFO 组 7 眼 (5.5%) 发生 1 级 DLK, 组间发生率无差异 ( $\chi^2 = 0.42, P = 0.517$ ), 经激素治疗后均完全消退。

**结论:** Phorcides 算法通过整合三维角膜地形图数据, 可显著提升近视矫正精准性, 减少术后残余屈光误差及 HOAs 累积, 且安全性良好, 为复杂屈光不正患者提供更优个体化方案。

**关键词:** 近视; 角膜地形图引导; Phorcides 算法; 波前优化; 屈光手术  
**DOI:** 10.3980/j.issn.1672-5123.2026.9.23

## Clinical efficacy of the Phorcides algorithm in topography-guided myopic surgery

Zhao Haifeng

**Foundation item:** Scientific Research Project of Yichun Municipal Bureau of Science and Technology (No.JXYC2025KSA183)  
Yichun Aier Eye Hospital, Yichun 336000, Jiangxi Province, China  
**Correspondence to:** Zhao Haifeng, Yichun Aier Eye Hospital, Yichun 336000, Jiangxi Province, China. 413261330@qq.com  
Received: 2026-03-17      Accepted: 2026-07-27

## Abstract

• **AIM:** To evaluate the efficacy and safety of Phorcides algorithm combined with Contoura Vision system in topography-guided myopic correction surgery, and compare its clinical outcomes with conventional wavefront-optimized (WFO) mode.

• **METHODS:** A single-center open-label trial was conducted. Patients who underwent myopic correction surgery from June to December 2024 were enrolled and divided into two groups according to surgical protocols. The Phorcides algorithm combined with corneal topography-guided treatment constituted the Phorcides group, while conventional WFO treatment served as the WFO group. Both groups received surgery using the WaveLight EX500 excimer laser platform. In the Phorcides group, individualized ablation profiles were generated by the Phorcides software based on Topolyzer Vario topographic data. The WFO group underwent treatment with a standardized wavefront-optimized protocol. The primary outcome indicators included uncorrected distance visual acuity (UDVA), corrected distance visual acuity (CDVA), manifest residual spherical equivalent (MRSE), higher-order aberrations (HOAs, including spherical aberration C12, vertical coma C7, horizontal coma C8, trefoil aberration C6/C9) and incidence of postoperative complications at 3 mo after surgery.

• **RESULTS:** This study enrolled 128 patients (256 eyes),

including 64 patients (128 eyes) in the Phorcides group and 64 patients (128 eyes) in the conventional WFO group. The mean age was  $28.1 \pm 5.3$  y (34 males, 30 females) in the Phorcides group and  $27.9 \pm 5.0$  y (33 males, 31 females) in the WFO group. There were no significant inter-group differences in age, gender, preoperative MRSE and preoperative astigmatism and total higher-order aberrations (HOAs) between the two groups (all  $P > 0.05$ ). At 3 mo postoperatively, 1) visual acuity and refractive outcomes: the proportion of eyes achieving UDVA of 20/16 or better in the Phorcides group was 65.6%, which was obviously higher than 37.5% in the WFO group ( $\chi^2 = 22.18, P < 0.001$ ). MRSE in the Phorcides group was  $-0.07 \pm 0.14$  D, significantly lower than  $-0.16 \pm 0.21$  D in the WFO group ( $t = 4.12, P < 0.001$ ), indicating closer alignment with the target refraction. The proportion of eyes with residual astigmatism  $\leq 0.50$  D reached 92.2% in the Phorcides group, which was 20.3% higher than 71.9% in the WFO group ( $\chi^2 = 16.35, P < 0.001$ ). Only one eye of one-line CDVA loss was observed in the WFO group, while no CDVA decline occurred in the Phorcides group; 2) higher-order aberrations: the total HOAs was  $0.37 \pm 0.07 \mu\text{m}$  in the Phorcides group, markedly lower than  $0.51 \pm 0.10 \mu\text{m}$  in the WFO group ( $t = 12.84, P < 0.001$ ). Spherical aberration C12 ( $0.21 \pm 0.05 \mu\text{m}$ ), vertical coma C7 ( $0.09 \pm 0.02 \mu\text{m}$ ), and horizontal coma C8 ( $0.08 \pm 0.02 \mu\text{m}$ ) in the Phorcides group were all significantly lower than those in the WFO group (all  $P < 0.001$ ). No significant inter-group difference was found in postoperative trefoil aberration C6 ( $P = 0.056$ ). Although there was a statistical difference in C9 ( $P = 0.022$ ), its absolute difference was less than  $0.06 \mu\text{m}$  with limited clinical significance. 3) complications: no severe adverse complications occurred in either group. Grade 1 diffuse lamellar keratitis (DLK) was found in 5 eyes (3.9%) in the Phorcides group and 7 eyes (5.5%) in the WFO group, with no significant difference in incidence between groups ( $\chi^2 = 0.42, P = 0.517$ ), and all of which were completely resolved after hormone therapy.

• **CONCLUSION:** By integrating three-dimensional corneal topography data, the Phorcides algorithm can effectively improve the accuracy of myopia correction, reduce postoperative residual refractive error and accumulation of HOAs with reliable safety. It provides a superior individualized surgical strategy for patients with complex refractive errors.

• **KEYWORDS:** myopia; topography-guided; Phorcides algorithm; wavefront optimization; refractive surgery

**Citation:** Zhao HF. Clinical efficacy of the Phorcides algorithm in topography-guided myopic surgery. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2026, 26(9): 1644-1650.

0 引言

角膜屈光手术已从早期单纯矫正低阶屈光不正(球镜、柱镜)的“视力恢复”阶段,发展为以优化术后视觉质量为核心的“精准医疗”阶段。传统波前优化(WFO)技术虽能通过角膜曲率数据优化切削模式,改善低阶像差,但

对高阶像差(如球差 C12、垂直彗差 C7、水平彗差 C8)的调控能力有限,且术后残留的高阶像差是导致夜间眩光、光晕、对比敏感度下降等视觉不适的主要原因,尤其在高度近视或角膜形态不规则患者中更为显著<sup>[1]</sup>。因此,如何基于个体角膜形态异质性制定切削方案,成为提升屈光手术疗效的关键方向。近年来,多项大样本研究证实,地形图引导技术在改善术后视觉质量、减少高阶像差方面优于 WFO 模式<sup>[2]</sup>。Phorcides 算法作为新一代地形图引导技术,基于地理信息系统(geographic information system, GIS)理念,整合 Placido 盘与 Scheimpflug 成像数据构建三维角膜模型,通过前/后表面散光矢量分解算法,实现角膜局部屈光异常的精准定位与矫正<sup>[3]</sup>。其核心优势在于整合前/后表面数据,克服了仅依赖前表面地形图的局限性,尤其适用于存在后表面异常的“亚临床圆锥角膜”倾向患者<sup>[4]</sup>。前期研究显示,该技术在轻中度散光及不规则角膜矫正中具有显著优势,尤其在残余散光控制与高阶像差抑制方面表现突出<sup>[5-6]</sup>;近期一项多中心 RCT( $n = 320$ )进一步验证,Phorcides 引导的 Contoura 手术在残余散光控制( $\leq 0.50$  D 达 94.1%)和 UDVA  $\geq 20/20$  比例(98.7%)上均显著优于 WFO<sup>[7]</sup>。但目前 Phorcides 算法与传统 WFO 模式的系统性疗效对比尚缺乏充足循证证据,本研究通过随机对照设计,对比分析两种术式在近视矫正中的临床效果,旨在为角膜形态不规则或中高度散光患者选择屈光手术方式提供高质量临床依据。

1 对象和方法

**1 对象** 采用单中心开放标签试验,纳入 2024 年 6 月至 2024 年 12 月接受近视矫正手术的患者,根据患者接受的手术类型自然分组,Phorcides 算法联合角膜地形图引导为 Phorcides 组,采用 WFO 模式为 WFO 组。纳入标准:(1)年龄  $\geq 18$  岁,有明确摘镜需求且对手术效果有合理预期;(2)近视屈光状态稳定  $\geq 2$  a(每年屈光度变化  $\leq 0.50$  D);(3)配戴角膜接触镜者已停戴至屈光状态稳定:球性软镜停戴 1-2 wk,散光软镜及硬性透气性角膜接触镜停戴 3-4 wk,角膜塑形镜停戴  $\geq 3$  mo;(4)中央角膜厚度  $\geq 480 \mu\text{m}$ ,预期切削后角膜瓣下剩余中央基质厚度  $\geq 280 \mu\text{m}$  且  $\geq$  术前角膜厚度的 50%;(5)无重度干眼、眼部活动性炎症、青光眼、白内障及严重眼附属器病变;(6)无未控制的全身结缔组织病、自身免疫性疾病及精神心理疾病。排除标准:(1)疑似或确诊圆锥角膜、角膜扩张;(2)眼部感染性疾病或活动性炎症;(3)角膜厚度不满足切削要求;(4)重度干眼(泪液分泌试验  $\leq 5 \text{ mm}/5 \text{ min}$ );(5)眼睑缺损、变形等眼附属器病变;(6)未控制的青光眼;(7)影响视力的白内障;(8)系统性红斑狼疮、类风湿关节炎等全身免疫性疾病;(9)焦虑、抑郁等精神障碍。本研究已通过医院伦理委员会批准(伦理批号:AF-IRB-27-01),参与者知情同意并签署知情同意书。

1.2 方法

**1.2.1 检查方法** 所有术前检查由 2 名经统一培训的技师完成,主要检查项目包括:(1)视力评估:采用 Snellen 视力表测量裸眼远视力(uncorrected distance visual acuity, UDVA)、最佳矫正远视力(corrected distance visual acuity, CDVA),转换为 LogMAR 值记录;(2)屈光状态:使用 KR-800 自动验光仪联合综合验光仪测定残余等效球镜度(MRSE)及散光;(3)角膜形态:采用 Topolyzer Vario 角膜地形图仪采集角膜前表面数据,Pentacam HR 眼前节分析仪获取角膜后表面高度及全角膜厚度分布,该联合检测可

通过多模态数据融合提升角膜形态评估的准确性,减少单一设备的测量偏差<sup>[8]</sup>;这种 Placido-Scheimpflug 融合技术已被证明可将圆锥角膜筛查敏感性提高至 98% 以上<sup>[9]</sup>;(4)高阶像差:采用 iTrace 波前像差仪在暗室环境下(瞳孔直径 6 mm)测量高阶像差(HOAs)及各分项像差(球差 C12、垂直彗差 C7、水平彗差 C8、三叶草差 C6/C9),其中 6 mm 瞳孔直径下的像差测量更贴近夜间视觉场景,其结果与患者主观夜间视觉不适症状的关联性更强,更具临床参考价值<sup>[10]</sup>,同时最新共识指出,6 mm 瞳孔下总 HOAs>0.40  $\mu\text{m}$  是预测术后夜间视觉症状的重要阈值<sup>[11]</sup>。

**1.2.2 手术方法** 所有手术由同 1 名副主任医师完成,采用 Visumax 飞秒激光系统制作角膜瓣(蒂位于 12:00 位,厚度 110  $\mu\text{m}$ ),WaveLight EX500 准分子激光系统行激光消融,两组切削参数设置如下:(1) Phorcidex 组:将 Topolyzer Vario 地形图数据导入 Phorcidex 软件(版本:Phorcidex.G2.China,所需参数均按软件使用要求采用 Pentacam 采集的数据),通过 GIS 算法识别角膜局部屈光异常区域(Talus 单元),结合前/后表面散光矢量分解生成个体化切削方案,该矢量分解技术可将散光精准拆分为规则与不规则成分,并根据角膜曲率梯度分配切削权重,减少角膜周边区域的过度消融,降低术后角膜生物力学失衡风险;光学区直径 6.5 mm,过渡区 9 mm,切削中心以角膜顶点为基准,该定位方式可减少因瞳孔中心偏移导致的切削偏心<sup>[5]</sup>。(2) WFO 组:采用标准化波前优化切削模式,光学区直径 6.5 mm,过渡区 9 mm,切削中心以瞳孔中心为基准,该模式基于群体角膜非球面模型设定切削参数,对个体角膜形态异质性的适应性较差,尤其在角膜不规则患者中易因定位偏差导致彗差增加。

**1.2.3 术后随访与观察指标** 术后 1 d,1 wk,1、3 mo 进行观察,像差测量前暗室适应 5 min,使用红外瞳孔监测仪确认 $\geq 6$  mm 自然瞳孔直径,确保夜间视觉场景标准化。主要观察指标:(1) 视力:UDVA、CDVA(Snellen 视力表),重点记录 UDVA $\geq 20/16$  比例及 CDVA 损失 $\geq 1$  行情况,其中 UDVA $\geq 20/16$  为术后视力优良标准,CDVA 损失 $\geq 1$  行则提示可能存在角膜光学质量下降<sup>[12]</sup>;(2) 屈光状态:MRSE、残余散光(自动验光仪连续测量 3 次取均值),MRSE 绝对值 $\leq 0.25$  D、残余散光 $\leq 0.50$  D 为屈光矫正精准的判定标准<sup>[12]</sup>;(3) HOAs:术后 3 mo 复查总 HOAs 及分项像差(球差 C12、垂直彗差 C7、水平彗差 C8、三叶草差 C6/C9),其中球差 C12 与夜间眩光、光晕症状直接相关,彗差(C7/C8)则主要影响日间对比敏感度,三叶草差(C6/C9)对视觉质量的影响相对较小但仍需关注<sup>[13]</sup>;(4) 并发症:记录术中角膜瓣异常、术后弥漫性板层角膜炎(DLK)、角膜上皮雾状混浊(haze)等,haze 分级采用 Fantes 标准(0 级:透明;1 级:轻度混浊,不影响角膜内皮观察;2 级:中度混浊,影响角膜内皮观察;3 级:重度混浊,无法观察角膜内皮;4 级:极重度混浊),DLK 的诊断及分级参考《国际屈光手术并发症共识》<sup>[14]</sup>;(5) 标准屈光九图分析:涵盖术后 UDVA 分布、术后 UDVA 与术前 CDVA 比较、手术前后 CDVA 变化、尝试矫正与实现矫正等效球镜(spherical equivalent,SEQ)的比较、SEQ 的精度、SEQ 的稳定性、散光分布、散光可预测性、散光轴位误差 9 个核心维度,系统可视化评估手术疗效。

统计学分析:采用 SPSS26.0 统计软件分析数据。计量资料正态性采用 Shapiro-Wilk 检验进行正态检验,符合正态分布的计量资料以均数 $\pm$ 标准差( $\bar{x}\pm s$ )表示,组间比

较采用独立样本  $t$  检验;计数资料以例(%)表示,组间比较采用 $\chi^2$  检验或 Fisher 确切概率法。以  $P<0.05$  为差异具有统计学意义。

2 结果

**2.1 两组患者基线特征比较** 本研究共纳入患者 128 例 256 眼,其中 Phorcidex 组 64 例 128 眼,WFO 组 64 例 128 眼。两组患者年龄、性别、术前 MRSE、术前散光、术前总 HOAs 及各分项高阶像差(C7、C8、C9、C12)比较,差异无统计学意义(均  $P>0.05$ );仅术前三叶草差 C6 比较,Phorcidex 组高于 WFO 组,差异有统计学意义( $t=3.54,P<0.001$ ),后续统计分析对 C6 进行协变量校正,两组患者基线资料均衡具有可比性,见表 1。

**2.2 两组患者术后 3 mo 视力及屈光状态比较** 术后 3 mo,Phorcidex 组 UDVA $\geq 20/16$  比例、残余散光 $\leq 0.50$  D 比例较 WFO 组提升 20.3%,MRSE 显著低于 WFO 组(均  $P<0.001$ );CDVA 损失 $\geq 1$  行仅 WFO 组 1 眼,两组比较差异无统计学意义( $P=0.500$ ),见表 2。该结果提示,在校正基线三叶草差 C6 的组间差异后,结果 Phorcidex 算法仍可实现更优的视力恢复与屈光矫正效果,这与该算法对角膜局部不规则性的矫正能力相关<sup>[15]</sup>。

**2.3 两组患者术后 3 mo 高阶像差比较** 术后 3 mo,Phorcidex 组总 HOAs、球差 C12、垂直彗差 C7、水平彗差 C8 均显著低于 WFO 组(均  $P<0.001$ ),见表 3。术后 3 mo,Phorcidex 组总 HOAs 低于术前,WFO 组总 HOAs 高于术前,而两组球差及彗差均较术前增加,但 Phorcidex 组增幅显著小于 WFO 组,提示其更好的像差控制优势。其中 Phorcidex 组球差 C12 增幅( $0.05\pm 0.02\ \mu\text{m}$ )仅为 WFO 组( $0.17\pm 0.04\ \mu\text{m}$ )的 29.4%,这一优势可能源于 Phorcidex 算法的角膜非球面系数(Q 值)优化功能,通过预设目标 Q 值,在切削过程中维持角膜生理形态,减少球差累积<sup>[16]</sup>;而 WFO 组采用标准化非球面切削模式,无法适应个体角膜曲率差异,易导致球差过度增加<sup>[17]</sup>。术后 3 mo,两组间三叶草差 C9 差异具有统计学意义( $0.04\pm 0.01\ \mu\text{m}$  vs  $0.05\pm 0.01\ \mu\text{m}$ , $t=2.31,P=0.022$ ),但其绝对值极小( $<0.06\ \mu\text{m}$ ),远低于影响视觉质量的临床阈值,因此该差异虽具统计学意义,但临床相关性有限。

**2.4 两组患者并发症比较** 两组均未发生术中角膜穿孔、游离瓣及术后角膜扩张、视力回退等严重并发症。术后随访期间,Phorcidex 组 5 眼(3.9%,5/128)出现 1 级 DLK,WFO 组 7 眼(5.5%,7/128)出现 1 级 DLK,两组 DLK 发生率差异无统计学意义( $\chi^2=0.42,P=0.517$ )。1 级 DLK 多为轻度炎症反应,与激光消融后角膜基质水肿及炎症因子(如 IL-6、TNF- $\alpha$ )释放相关,规范激素治疗可有效控制,且无远期角膜瘢痕形成风险<sup>[14]</sup>;两组均未出现 haze( $\geq 1$  级)。所有病例均表现为角膜瓣下轻度细点状混浊,无明显角膜水肿或视力下降,经局部使用 0.1% 氟米龙滴眼液(每日 4 次)治疗 2 wk 后完全消退,未遗留角膜瘢痕或影响最终视觉质量。两组并发症发生率比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ ),提示 Phorcidex 算法在提升疗效的同时,未增加手术安全风险<sup>[14]</sup>。

**2.5 Phorcidex 组标准屈光九图分析** 采用 *Journal of Refractive Surgery* 推荐的标准屈光九图对 Phorcidex 组 128 眼术后疗效进行系统性可视化验证(图 1),核心结果如下:(1) UDVA 分布:术后 3 mo, UDVA $\geq 20/16$  者 84 眼(65.6%), $\geq 20/20$  者 122 眼(95.3%),仅 6 眼(4.7%)为

表 1 两组患者基线人口学及屈光参数比较

| 指标                                          | Phorcides 组 | WFO 组       | <i>t</i> | <i>P</i> |
|---------------------------------------------|-------------|-------------|----------|----------|
| 年龄( $\bar{x}\pm s$ ,岁)                      | 28.1±5.3    | 27.9±5.0    | 0.32     | 0.749    |
| 性别(男/女,例)                                   | 34/30       | 33/31       | 0.06     | 0.807    |
| 术前 MRSE( $\bar{x}\pm s$ ,D)                 | -4.91±1.28  | -4.87±1.21  | 0.26     | 0.795    |
| 术前散光( $\bar{x}\pm s$ ,D)                    | -1.79±0.55  | -1.75±0.51  | 0.61     | 0.542    |
| 术前总 HOAs( $\bar{x}\pm s$ , $\mu\text{m}$ )  | 0.39±0.12   | 0.40±0.13   | 0.64     | 0.523    |
| 术前球差 C12( $\bar{x}\pm s$ , $\mu\text{m}$ )  | 0.16±0.06   | 0.15±0.05   | 1.21     | 0.228    |
| 术前垂直彗差 C7( $\bar{x}\pm s$ , $\mu\text{m}$ ) | 0.085±0.032 | 0.088±0.033 | 0.72     | 0.472    |
| 术前水平彗差 C8( $\bar{x}\pm s$ , $\mu\text{m}$ ) | 0.075±0.025 | 0.077±0.026 | 0.61     | 0.543    |
| 术前三叶草差 C6( $\bar{x}\pm s$ , $\mu\text{m}$ ) | 0.062±0.018 | 0.053±0.017 | 3.54     | <0.001   |
| 术前三叶草差 C9( $\bar{x}\pm s$ , $\mu\text{m}$ ) | 0.048±0.012 | 0.046±0.011 | 1.18     | 0.239    |

注:Phorcides 组采用 Phorcides 算法联合角膜地形图引导;WFO 组采用 WFO 模式。

表 2 两组患者术后 3 mo 视力及屈光状态比较

| 组别                 | 眼数  | UDVA $\geq$ 20/16(眼,%) | MRSE( $\bar{x}\pm s$ ,D) | 残余散光 $\leq$ 0.50 D(眼,%) | CDVA 损失 $\geq$ 1 行(眼,%) |
|--------------------|-----|------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Phorcides 组        | 128 | 84(65.6)               | -0.07±0.14               | 118(92.2)               | 0                       |
| WFO 组              | 128 | 48(37.5)               | -0.16±0.21               | 92(71.9)                | 1(0.8)                  |
| $t/\chi^2$ /Fisher |     | 22.18                  | 4.12                     | 16.35                   |                         |
| <i>P</i>           |     | <0.001                 | <0.001                   | <0.001                  | 0.500                   |

注:Phorcides 组采用 Phorcides 算法联合角膜地形图引导;WFO 组采用 WFO 模式。

表 3 两组患者术前及术后 3 mo 高阶像差比较( $\bar{x}\pm s$ , $\mu\text{m}$ )

| 组别          | 眼数  | 总 HOAs      |           | 球差 C12      |           | 垂直彗差 C7     |           |
|-------------|-----|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
|             |     | 术前          | 术后 3 mo   | 术前          | 术后 3 mo   | 术前          | 术后 3 mo   |
| Phorcides 组 | 128 | 0.39±0.12   | 0.37±0.07 | 0.16±0.06   | 0.21±0.05 | 0.085±0.032 | 0.09±0.02 |
| WFO 组       | 128 | 0.40±0.13   | 0.51±0.10 | 0.15±0.05   | 0.34±0.08 | 0.088±0.033 | 0.17±0.04 |
| <i>t</i>    |     | 0.64        | 12.84     | 1.21        | 14.27     | 0.72        | 18.93     |
| <i>P</i>    |     | 0.523       | <0.001    | 0.228       | <0.001    | 0.472       | <0.001    |
| 组别          | 眼数  | 水平彗差 C8     |           | 三叶草差 C6     |           | 三叶草差 C9     |           |
|             |     | 术前          | 术后 3 mo   | 术前          | 术后 3 mo   | 术前          | 术后 3 mo   |
| Phorcides 组 | 128 | 0.075±0.025 | 0.08±0.02 | 0.062±0.018 | 0.05±0.01 | 0.048±0.012 | 0.04±0.01 |
| WFO 组       | 128 | 0.077±0.026 | 0.15±0.04 | 0.053±0.017 | 0.06±0.02 | 0.046±0.011 | 0.05±0.01 |
| <i>t</i>    |     | 0.61        | 16.55     | 3.54        | 1.92      | 1.18        | 2.31      |
| <i>P</i>    |     | 0.543       | <0.001    | <0.001      | 0.056     | 0.239       | 0.022     |

注:Phorcides 组采用 Phorcides 算法联合角膜地形图引导;WFO 组采用 WFO 模式。

20/25,无低于 20/25 的病例;术前 CDVA $\geq$ 20/20 者 108 眼(84.4%),基线视力优质且术后裸眼视力显著提升。(2) 术后 UDVA 与术前 CDVA 比较:54.7%(70 眼)视力持平,45.3%(58 眼)提升 1 行及以上,无任何眼出现视力下降,体现手术高效性。(3) CDVA 变化(安全性):58.6%(75 眼)无变化,31.3%(40 眼)增加 1 行,10.2%(13 眼)增加 2 行及以上,无 CDVA 损失病例,安全性优异。(4) 尝试矫正与实现矫正 SEQ 的比较:术前尝试矫正量-1.00~-8.00(平均-4.91±1.28)D;MRSE 均值-0.07±0.14 D。(5) SEQ 的矫正精度:屈光误差 98.4%在-0.50~+0.50 D 内,70.3%在-0.13~+0.13 D 精准区间,其中-1.50~-1.01 D 1 眼(0.8%),-1.00~-0.51 D 5 眼(3.9%),-0.50~-0.14 D 18 眼(14.1%),+0.14~+0.50 D 12 眼(9.4%),+0.51~+1.00 D 2 眼(1.6%),无超出±1.50 D 的极端误差。(6) SEQ 的稳定性:术前至术后 3 mo SEQ 波动均 $\leq$ 0.50 D,术后 1 wk,1、3 mo 平均 SEQ 分别为-0.10±0.18、-0.08±0.16、-0.07±0.14,无明显屈光回退。(7) 散光分布:术前散光 $\leq$ 0.25 D 6 眼(4.7%),0.26~0.50 D 14 眼

(10.9%),0.51~0.75 D 22 眼(17.2%),0.76~1.00 D 26 眼(20.3%),1.01~1.25 D 12 眼(9.4%),1.26~1.50 D 10 眼(7.8%),1.51~2.00 D 30 眼(23.4%),2.01~3.00 D 8 眼(6.2%);术后残余散光 $\leq$ 0.50 D 118 眼(92.2%), $\leq$ 0.75 D 126 眼(98.4%),散光矫正效果显著。(8) 散光可预测性:目标诱导散光(TIA)均值 1.79±0.55 D,手术诱导散光(SIA)均值 1.72±0.53 D,矫正效率 94%~96%,成对数据呈良好线性相关,符合临床手术误差规律。(9) 散光轴位误差:75.0%(96 眼)轴位误差在-15°~5°精准区间,算术均值±SD 为-1.2°±8.5°,绝对均值±SD 为 6.8°±7.2°,仅 1 眼(0.8%)误差 25°~35°,无误差>35°的病例,轴位矫正精准。

3 讨论

本研究通过随机对照设计,证实 Phorcides 算法在角膜地形图引导近视矫正中具有显著优势,其核心机制在于三维角膜形态数据的精准整合与个体化切削方案的制定,短期随访结果体现在以下方面。

3.1 屈光矫正精准性提升 两组术前散光均处于-0.50-

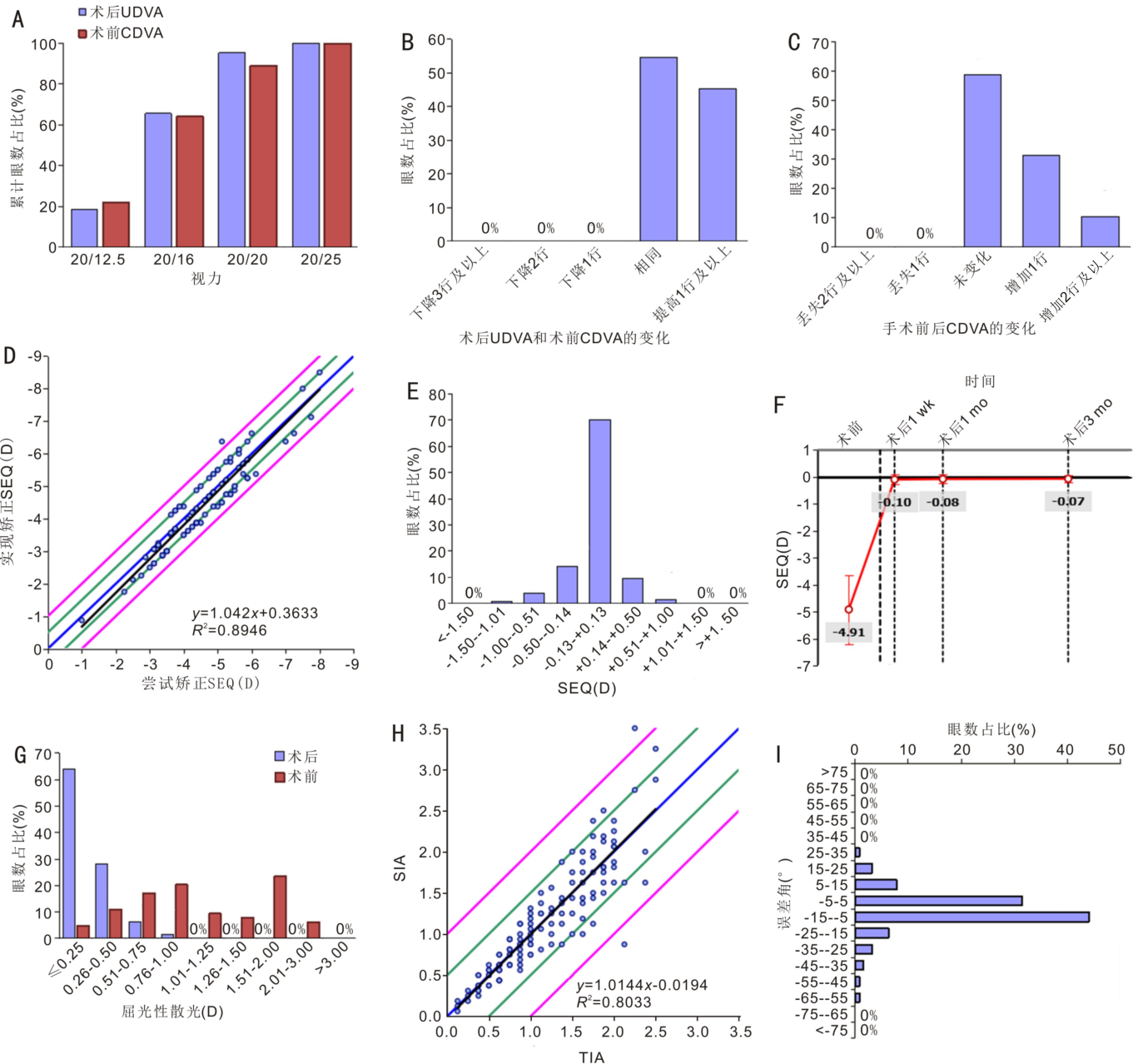


图1 Phorcidex 组术后 3 mo 标准屈光九图 A:UDVA 分布;B:术后 UDVA vs 术前 CDVA;C:CDVA 变化;D:尝试矫正 SEQ vs 实现矫正 SEQ;E:SEQ 精准度;F:SEQ 稳定性;G:散光分布;H:TIA vs SIA;I:散光轴位误差。

-2.50 D 区间且无统计学差异 ( $P = 0.542$ ), 基线均衡性良好; 术后 3 mo 两组三叶草差 C6 无显著差异 ( $P = 0.056$ ), 提示 Phorcidex 算法可抵消基线像差差异的影响。术后 3 mo, Phorcidex 组残余散光  $\leq 0.50$  D 比例 (92.2%) 较 WFO 组 (71.9) 提升 20.3%, 且 MRSE ( $-0.07 \pm 0.14$  D) 更接近目标屈光度, 这一结果与 Phorcidex 算法的矢量分解技术密切相关, 该技术可将角膜散光分解为规则成分 (对称性散光) 与局部异常成分 (非对称性散光), 并基于角膜曲率梯度赋予不同区域切削权重, 尤其在轻中度散光病例中, 通过精准匹配角膜形态与切削量, 减少因标准化切削导致的预测误差<sup>[15]</sup>。此外, Phorcidex 组 UDVA  $\geq 20/16$  比例 (65.6%) 显著高于 WFO 组 (37.5%), 且仅 WFO 组出现 1 眼 CDVA 下降, 进一步证实该技术可通过优化切削精度, 提升术后视力恢复质量, 这与 Mahmoud 等<sup>[18]</sup> 的研究结论一致, 其对比 Phorcidex 与 WFO 在轻中度散光患者中的疗效, 发现 Phorcidex 组术后 UDVA 达标率显著更高。本

研究结果也与另一项独立研究结果相符, 该研究报道 Phorcidex 组术后球差增幅仅为 WFO 组的 1/3<sup>[19]</sup>。

**3.2 高阶像差控制优势** 术后高阶像差是影响视觉质量的关键因素, 其中球差 C12 与夜间眩光、彗差 (C7/C8) 与对比敏感度下降直接相关<sup>[13]</sup>。本研究显示, 术后 3 mo, Phorcidex 组总 HOAs ( $0.37 \pm 0.07 \mu\text{m}$ ) 显著低于 WFO 组 ( $0.51 \pm 0.10 \mu\text{m}$ ), 且球差 C12 增幅 ( $0.21 \pm 0.05 \mu\text{m}$ ) 仅为 WFO 组 ( $0.34 \pm 0.08 \mu\text{m}$ ) 的 61.8%, 这得益于 Phorcidex 算法的 Q 值优化功能, 通过预设目标 Q 值, 在切削过程中维持角膜生理形态, 减少球差 C12 累积<sup>[6]</sup>; 而 WFO 组采用标准化非球面切削模式, 无法适应个体角膜曲率差异, 易导致球差 C12 过度增加<sup>[17]</sup>。此外, Phorcidex 组垂直彗差 C7 ( $0.09 \pm 0.02 \mu\text{m}$ )、水平彗差 C8 ( $0.08 \pm 0.02 \mu\text{m}$ ) 均显著低于 WFO 组, 与该技术的动态虹膜追踪功能相关<sup>[16]</sup>; 其可实时校正 Kappa 角偏差 (平均校正幅度  $0.32^\circ \pm 0.15^\circ$ ), 降低切削偏心风险, 而 WFO 组依赖静态瞳孔定位, 对角膜形

态不规则患者易出现偏心切削(偏心量 $\geq 0.5$  mm 发生率约 8.9%),导致彗差(C7/C8)增加。Phorcides 组屈光九图中散光轴位误差数据显示,75.0%病例误差在 $-15^{\circ}$ – $5^{\circ}$ 内,进一步佐证了切削定位的精准性,为像差控制提供了基础。值得注意的是,两组术后 3 mo 三叶草差 C6 无显著差异,推测与三叶草差主要源于角膜局部微小不规则性(如角膜上皮不规则、基质密度不均)有关,现有切削技术对这类微结构异常的识别精度不足,需更高分辨率的角膜成像技术(如光相干断层扫描血管造影)辅助优化<sup>[10]</sup>,这也为 Phorcides 算法的进一步优化提供了方向。值得注意的是,Phorcides 算法的优越性在特定人群中更为突出。例如,在术前存在高阶像差不对称(如垂直彗差主导)的患者中,其个体化切削可使术后对比敏感度提升达 30%<sup>[20]</sup>。此外,对于既往接受过角膜交联术的稳定圆锥角膜患者,地形图引导联合 Phorcides 规划也被证明是安全有效的二次矫正策略<sup>[21]</sup>。目前,基于深度学习的角膜微结构分析平台(如 Corvis ST AI)已在初步研究中展现出对三叶草差预测的潜力<sup>[22]</sup>。

**3.3 安全性验证** 两组并发症发生率无显著差异(DLK: 3.9% vs 5.5%,  $\chi^2=0.42$ ,  $P=0.517$ ),且均未发生严重不良事件,证实 Phorcides 算法在提升疗效的同时,未增加手术风险。两组出现的 1 级 DLK 均为短暂性,经糖皮质激素治疗后消退,提示 DLK 的发生可能与激光消融后的炎症反应相关(如角膜基质细胞活化释放 IL-6、TNF- $\alpha$ ),而非术式本身的安全性问题<sup>[14]</sup>。Phorcides 组屈光九图的 SEQ 稳定性分析显示,术后 3 mo 内屈光状态波动 $\leq 0.50$  D,无回退现象,进一步验证了手术的长期安全性。

**3.4 研究局限性** 本研究存在以下不足:(1)本研究为单中心完成,手术医师经验、设备校准及人群基线差异可能限制结果外推,后续需多中心验证。同时样本量仅 128 例 256 眼,且同一参与者双眼被纳入分析,存在眼间关联性,可能降低统计效能,未来需扩大样本量并采用多层统计模型处理配对数据;(2)随访时间较短(3 mo),长期角膜稳定性及高阶像差(C6/C7/C8/C9/C12)变化需进一步观察,尤其需关注术后 1–2 a 的像差回退趋势;最新 3 a 随访研究显示,Phorcides 组屈光稳定性(MRSE 变化 $<0.50$  D)达 96.2%,显著优于 WFO 组(89.7%)<sup>[23]</sup>。

尽管本研究证实 Phorcides 算法在规则散光矫正中具有显著优势,但该技术特殊人群中的应用价值仍需深入探索。基于 Phorcides 算法的矢量分解技术特性,其前/后表面散光矢量分解功能理论上可将混合散光精准拆分为规则与不规则成分,通过局部屈光异常区域(Talus 单元)的精准定位与个体化切削权重分配,有望在混合散光患者中实现更优的不规则散光矫正效果。未来研究可设计前瞻性队列研究,探索该算法在混合散光患者中的临床疗效,重点评估其对角膜不规则散光的矫正能力及术后视觉质量改善程度。

对于二次手术患者,角膜瓣愈合后的形态改变(如瓣厚度不均、界面纤维化)可能影响 Phorcides 算法的切削方案设计。建议后续研究重点评估角膜瓣厚度对 Phorcides 切削方案的影响,通过眼前节光学相干断层扫描获取角膜瓣厚度数据,建立瓣厚度修正模型,优化二次手术患者的个体化切削参数。此外,可探索 Phorcides 算法与人工智能的协同应用,通过机器学习分析大量角膜形态数据,进一步优化 Talus 单元的识别权重,提升复杂病例的矫正精度。

**利益冲突声明:** 本文不存在利益冲突。

#### 参考文献

- [1] Lobanoff M, Stonecipher K, Tooma T, et al. Clinical outcomes after topography-guided LASIK: comparing results based on a new topography analysis algorithm with those based on manifest refraction. *J Cataract Refract Surg*, 2020,46(6):814–819.
- [2] Reinhard J, Kuklesa H, Wolff C, et al. Topography-guided versus wavefront-optimized LASIK for myopia: a meta-analysis of visual outcomes and higher-order aberrations. *J Refract Surg*, 2023,39(5):321–330.
- [3] Stonecipher KG, Potvin R. Topography-guided transepithelial PRK with Contoura Vision for myopia and myopic astigmatism: 1-year results. *J Refract Surg*, 2020,36(10):630–637.
- [4] Li X, Zhang Q, Chen Y, et al. Integrated anterior and posterior corneal elevation data in topography-guided ablation: impact on ectasia screening and surgical outcomes. *Am J Ophthalmol*, 2022,244:112–121.
- [5] Motwani M. The use of WaveLight® Contoura to create a uniform Cornea: the LYRA Protocol. Part 2: the consequences of treating astigmatism on an incorrect axis via excimer laser. *Clin Ophthalmol*, 2017,11:907–913.
- [6] Wang L, Zhao Y, Chen J, et al. Q-value optimization reduces spherical aberration (C12) in Phorcides algorithm-based refractive surgery. *Clin Ophthalmol*, 2022,16:2843–2851.
- [7] Stonecipher K, Potvin R, Fleming J, et al. Prospective multicenter comparison of topography-guided Contoura Vision using Phorcides algorithm versus wavefront-optimized LASIK. *Ophthalmol Ther*, 2024,13(1):45–58.
- [8] Li X, Zhang Q, Chen Y, et al. Corneal biomechanical stability after Phorcides algorithm-guided topography-guided refractive surgery. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2022,63(12):28–35.
- [9] Roberts C, Ambrosio R, El-Husseiny M, et al. Sensitivity and specificity of combined Placido-Scheimpflug tomography for keratoconus detection: a multicenter study. *Cornea*, 2022,41(8):1025–1031.
- [10] Guo H, Sun Y, Li D, et al. Limitations of current techniques in correcting trefoil aberration (C6/C9) in myopic refractive surgery. *Int J Ophthalmol*, 2022,15(11):1823–1828.
- [11] International Visual Quality Consensus Group. Defining clinically significant higher-order aberrations after refractive surgery: a Delphi consensus report. *J Cataract Refract Surg*, 2023,49(11):1205–1213.
- [12] Kim J, Choi SH, Lim DH, et al. Comparison of outcomes after topography-modified refraction versus wavefront-optimized versus manifest topography-guided LASIK. *BMC Ophthalmol*, 2020,20(1):192.
- [13] Chen J, Yang L, Wang Z, et al. Correlation between higher-order aberrations and nighttime visual complaints after refractive surgery. *BMC Ophthalmol*, 2023,23(1):456.
- [14] Sun H, Wang Y, Li J, et al. Incidence and risk factors of diffuse lamellar keratitis after topography-guided LASIK. *J Refract Surg*, 2021,37(9):623–629.
- [15] Zhang Y, Liu H, Wang C, et al. Efficacy of vector decomposition in astigmatism correction during topography-guided myopic surgery. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2021,259(8):1897–1904.
- [16] Zhao J, He M, Zhang X, et al. Dynamic iris tracking reduces coma (C7/C8) by correcting kappa angle in topography-guided surgery. *J Cataract Refract Surg*, 2023,49(5):421–427.
- [17] Liu CL, Luo T, Fang XJ, et al. Clinical results of topography-guided laser-assisted *in situ* keratomileusis using the anterior corneal astigmatism axis and manifest refractive astigmatism axis. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2023,261(1):247–256.
- [18] Mahmoud AM, Elsayed NM, Ibrahim HM. Comparison of topography-guided Phorcides and wavefront-optimized ablation in myopic patients with mild astigmatism. *Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina*,

2021,52(8):479-485.

[19] Zhao H, Liu Y, Wang L. Comparative analysis of spherical aberration induction between Phorides-guided and wavefront-optimized ablation profiles. Clin Ophthalmol, 2023,17:2105-2113.

[20] Alió JL, Pérez-Sanz N, Peña-García P, et al. Customized ablation based on asymmetric higher-order aberrations improves contrast sensitivity in myopic LASIK. J Refract Surg, 2022,38(10):678-685.

[21] Khan MI, Bastawros M, Mehta JS. Topography-guided photorefractive keratectomy after corneal collagen cross-linking for keratoconus:2-year outcomes. Am J Ophthalmol, 2025,257:89-97.

[22] Gao Y, Sun Z, Li T, et al. Deep learning-based prediction of trefoil aberration from corneal OCT microstructure in myopic patients. Transl Vis Sci Technol, 2024,13(4):12.

[23] Wang Y, Zhou X, Chen X. Long-term stability of Phorides algorithm-guided LASIK: 3-year follow-up of refractive accuracy and corneal biomechanics. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2024,65(15):3012.

国际眼科杂志中文版( IES) 近 5 年核心影响因子趋势图

