

上方与颞侧切口对 ICL 植入术术源性散光的矢量影响

赵王华,许兰花,陈霞,黄舒甜,朱良勇

引用:赵王华,许兰花,陈霞,等. 上方与颞侧切口对 ICL 植入术术源性散光的矢量影响. 国际眼科杂志, 2026, 26 (11): 1998-2003.

基金项目:广西壮族自治区卫健委西医类别自筹经费科研课题(No. Z-A20231294)

作者单位:(530012)中国广西壮族自治区南宁市,南宁爱尔眼科医院

作者简介:赵王华,男,硕士研究生,副主任医师,研究方向:屈光手术。

通讯作者:朱良勇,男,硕士研究生,副主任医师,研究方向:屈光手术. zhuliangyong@aierchina.com

收稿日期:2026-06-16 修回日期:2026-09-20

摘要

目的:量化评估不同切口位置对有晶状体眼后房型人工晶状体(ICL)植入术所致术源性散光(SIA)的矢量影响,明确角膜前、后表面在 SIA 形成中的相对贡献。

方法:前瞻性纳入 2023 年 7 月 1 日至 2024 年 1 月 1 日行 ICL/TICL 植入术的患者,根据预期残留散光轴向分为上方切口组与颞侧切口组。于术前及术后 3 mo 采用 Pentacam 测量全角膜屈光力、前后表面曲率半径,计算前、后表面屈光力及总角膜散光。采用 Thibos 矢量分析法将散光分解为 J0 与 J45 分量,计算各层面 J0 变化量($\Delta J0$)。采用多元线性回归分析前、后表面 $\Delta J0$ 及切口位置对总角膜 $\Delta J0$ 的影响。

结果:本研究纳入患者 162 例 162 眼,上方切口组 75 例 75 眼,颞侧切口组 87 例 87 眼。完成随访 154 例 154 眼,上方切口组 72 例 72 眼(男 17 例,女 55 例,年龄 25.96 ± 6.17 岁),颞侧切口组 82 例 82 眼(男 20 例,女 62 例,年龄 27.79 ± 6.47 岁)。上方切口组术后总角膜及前表面 J0 向正值(逆规化)转变($\Delta J0$ 分别为 0.146 ± 0.108 、 0.199 ± 0.117 D),后表面 J0 向负值(顺规化)转变($\Delta J0 = -0.050\pm 0.022$ D);颞侧切口组呈相反变化趋势。多元回归分析显示,模型拟合优度极佳(调整 $R^2 = 0.943$),前表面 $\Delta J0$ 是主要影响因素($B = 0.968, \beta = 1.137, P < 0.001$),后表面 $\Delta J0$ 亦具有显著贡献($B = 1.018, \beta = 0.297, P < 0.001$)。切口位置及其与前、后表面 $\Delta J0$ 的交互项无差异(均 $P > 0.05$)。

结论:基于术后 3 mo 随访,上方切口诱导的 SIA 偏向逆规散光,颞侧切口诱导的 SIA 偏向顺规散光;前表面 SIA 是总角膜 SIA 的主要贡献因素,后表面亦表现出统计学上显著的关联。

关键词:有晶状体眼人工晶状体(ICL)植入术;术源性散光;Thibos 矢量分析;角膜后表面

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2026.11.22

Vector effect of superior versus temporal incisions on surgically induced astigmatism after ICL implantation

Zhao Wanghua, Xu Lanhua, Chen Xia, Huang Shutian, Zhu Liangyong

Foundation item: Self-funded Research Project of Western Medicine Category, Health Commission of Guangxi Zhuang Autonomous Region (No.Z-A20231294)

Nanning Aier Eye Hospital, Nanning 530012, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China

Correspondence to: Zhu Liangyong. Nanning Aier Eye Hospital, Nanning 530012, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China. zhuliangyong@aierchina.com

Received:2026-06-16 Accepted:2026-09-20

Abstract

• **AIM:** To quantitatively evaluate the vectorial effect of different incision locations on surgically induced astigmatism (SIA) following implantable collamer lens (ICL) implantation and to clarify the relative contributions of the anterior and posterior corneal surfaces to total corneal SIA.

• **METHODS:** A prospective study was conducted on who underwent ICL/toric ICL implantation between July 1, 2023 and January 1, 2024. Patients were divided into superior incision group and temporal incision group according to the expected postoperative residual astigmatism. Pentacam measurements were performed preoperatively and at 3 mo postoperatively to obtain total corneal refractive power and anterior and posterior corneal curvature radii. Anterior and posterior corneal surface powers and total corneal astigmatism were calculated. Thibos vector analysis was applied to decompose corneal astigmatism into orthogonal components J0 and J45, and the changes in J0 ($\Delta J0$) were calculated for each surface. Multiple linear regression analysis was performed to explore the associations of anterior surface $\Delta J0$, posterior surface $\Delta J0$, and incision location with total corneal $\Delta J0$.

• **RESULTS:** This study included 162 patients (162 eyes), with 75 patients 75 eyes in the superior incision group and 87 patients 87 eyes in the temporal incision group. Totally 154 patients (154 eyes) completed follow-up: 72 patients (72 eyes) in the superior incision group (17 males and 55 females, aged 25.96 ± 6.17 y) and 82 patients (82 eyes) in the temporal incision group (20 males and 62 females, aged 27.79 ± 6.47 y). In the superior incision group, the total cornea and anterior surface J0 shifted toward positive values (against-the-rule), with $\Delta J0$ of $0.146\pm$

0.108 D and 0.199 ± 0.117 D, respectively, while the posterior surface J0 shifted toward negative values (with-the-rule), with $\Delta J0$ of -0.050 ± 0.022 D. The temporal incision group showed the opposite trend. Multiple regression analysis showed an excellent model fit (adjusted $R^2 = 0.943$), with anterior surface $\Delta J0$ as the main influencing factor ($B = 0.968$, $\beta = 1.137$, $P < 0.001$) and posterior surface $\Delta J0$ also contributing independently and significantly ($B = 1.018$, $\beta = 0.297$, $P < 0.001$). Incision location and its interaction terms with anterior and posterior surface $\Delta J0$ were not statistically significant (all $P > 0.05$).

• **CONCLUSION:** Based on 3 mo postoperative followup, superior incisions induce a predominant withtherule SIA vector, while temporal incisions induce a predominant againsttherule SIA vector. Anterior surface $\Delta J0$ is the primary contributor to total corneal $\Delta J0$, and posterior surface $\Delta J0$ also demonstrates a statistically significant association.

• **KEYWORDS:** phakic intraocular lens (ICL) implantation; surgically induced astigmatism; Thibos vector analysis; posterior corneal surface

Citation: Zhao WH, Xu LH, Chen X, et al. Vector effect of superior versus temporal incisions on surgically induced astigmatism after ICL implantation. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2026, 26(11):1998–2003.

0 引言

有晶状体眼后房型人工晶状体(implantable collamer lens, ICL)植入术是一种将矫正近视、散光的超薄微型镜片放置于眼球的后房间隙以达到矫正屈光不正目的的手术,与传统的近视激光手术相比,其具有视觉质量更优、无回退风险、安全可逆、无需切削角膜组织、矫正度数范围更广等优点,目前,已成为治疗高度近视的主流术式之一。该术式于 2005 年通过美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)严格的临床认证,截至 2024 年,全球已经有超过 300 万人进行了 ICL 植入手术^[1-2]。然而,术后残留散光是影响其视觉质量的重要因素。研究表明,若残留散光度数超过 0.75 D,患者可能出现视物模糊、重影、视疲劳、眩晕及立体视功能下降等多种症状^[3-5]。其中,手术切口导致角膜曲率变化所引发的术源性散光(surgically induced astigmatism, SIA),是造成术后散光残留的重要原因。SIA 作用机制可归纳为三点:角膜曲率平坦化、陡峭化以及切口愈合产生的扭矩作用改变角膜整体曲率分布^[6],在这三者中,扭矩作用本身存在不确定性,而角膜前、后表面在平坦化与陡峭化过程中的具体贡献仍存在学术争议。例如, Kaushik 等^[7]指出,角膜前后表面曲率变化均参与了 SIA 的构成;相反, Sheoran 等^[8]研究则认为仅前表面曲率发生显著改变,后表面曲率则保持相对稳定,这一分歧提示,角膜前后表面在 SIA 形成中的作用机制仍需深入探索。针对这一核心争议,本研究采用 Thibos 屈光力矢量分析法对散光进行处理和分析^[9],并系统比较上方切口与颞侧切口术前术后该轴向上的屈光力变化,该方法可以在一定程度上排除扭矩作用的干扰,帮助我们更聚焦地探讨角膜前后表面平坦化与陡峭化在 SIA

形成中的具体作用,以期优化手术切口设计、提高术后视觉质量提供一些理论依据。

1 对象和方法

1.1 对象 前瞻性研究。连续纳入 2023 年 7 月 1 日至 2024 年 1 月 1 日于我院行 ICL/TICL 植入术患者,依据术前评估的预期术后残留散光情况选择不同切口,预期残留顺规散光的患者选择上方切口,预期残留逆规散光的患者选择颞侧切口,本研究采用标准化切口轴向的研究设计,仅纳入切口位于正上方(12:00 方向)或颞侧(3:00 或 9:00 方向)的病例。临床中术者根据个体情况将透明角膜切口置于正上方或颞侧之外的,此类病例因切口轴向随个体散光轴向变化而不统一, SIA 矢量方向混杂,无法满足本研究中组间比较的统计学要求,则不纳入本次分析。纳入标准:(1)患者有通过 ICL 植入术改善屈光状态的愿望,对手术疗效有合理期望。(2)年龄 18–45 岁。(3)近视或合并散光的患者,球镜度数:–0.5--18.0 D,柱镜度数 ≤ -6.0 D,连续 2 a 每年屈光度数变化 ≤ 0.5 D。(4)角膜内皮细胞数 $\geq 2\,000$ cell/mm²,细胞形态稳定。(5)前房深度 ≥ 2.8 mm,房角开放。(6)无其他明显影响视力的眼部疾病和影响手术恢复的全身器质性病变。排除标准:(1)圆锥角膜或其他角膜扩张疾病未稳定。(2)角膜内皮营养不良。(3)重度干眼。(4)活动性眼部病变或感染。(5)严重的眼睑附属器病变,如眼睑缺损、变形、眼睑闭合不全。(6)青光眼、白内障、明显影响视力的眼底疾病。(7)严重焦虑、抑郁等精神心理疾病。(8)无法配合检查和手术的疾病如癫痫、癔症等。(9)严重甲状腺机能亢进及其突眼且病情未稳定。(10)患者不能定期配合完善相关检查。本研究取得南宁爱尔眼科医院伦理委员会审查批准(批准号: NNAIER–2023–03),所有参与者知情本次研究目的并均签署知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 手术方法 所有手术由同一位手术医师完成,根据患者术前散光情况选用中央孔型 V4C ICL 或 V4C TICL 植入。常规消毒、铺巾,根据眼部散光情况用 2.8 mm 马尼刀于上方或颞侧制作角膜主切口,前房注入透明质酸钠,推注器植入 ICL 于睫状沟并调整位置居中,生理盐水冲洗透明质酸钠后密闭切口、形成前房。

1.2.2 检查方法 所有参与者均于术前及术后 3 mo 随访时接受 Pentacam 三维眼前节分析系统检查。检查在暗室环境中进行,受检者取坐位,下颌置于颌托上,前额紧贴额带,嘱其自然睁眼并注视 Scheimpflug 相机中央的固视标,确保角膜顶点居中对位。选择 25 张 Scheimpflug 图像的扫描模式,选取以角膜顶点为中心、直径 4.0 mm 区域的测量数据进行分析。每眼连续采集 3 次高质量图像,取平均值纳入最终分析。测量过程由同一位经验丰富的技术人员完成,以最大限度减少操作者间差异。

质量控制标准如下:仅纳入 Pentacam 自带质量报告评定为“OK”的扫描结果;3 次测量中角膜曲率值差异超过 0.25 D 或散光轴向差异超过 5°者,予以剔除并重新测量。所有患者检查前至少 7 d 未配戴角膜接触镜,检查前 5 min 滴用不含防腐剂的人工泪液以稳定泪膜,确保角膜表面光滑,检查时患者自然眨眼,避免因泪膜不稳定或眼位偏斜所致的测量误差。依据公式:前表面屈光力=(角膜折射率 1.376–空气折射率 1.000)×1000/前表面曲率半径,后表面屈光力=(房水折射率 1.336–角膜折射率

1.376)×1000/后表面曲率半径,计算角膜前、后表面的屈光力。由此进一步获得角膜前表面散光、后表面散光及总角膜散光。采用Thibos 屈光力矢量分析法,将散光分解为J0与J45分量[J0=(C/2)×cos(2θ),J45=(C/2)×sin(2θ),C:散光度,θ:陡峭轴]。分组比较术前与术后的J0值,计算出角膜前表面ΔJ0、后表面ΔJ0及总角膜ΔJ0,并运用多元线性回归分析探究三者间的影响关系(图1)。

统计学分析:使用SPSS25.0软件进行数据分析。采用Shapiro-Wilk 检验对各连续变量进行正态性检验。符合正态分布的计量资料用 $\bar{x}\pm s$ 描述,两组间比较采用独立样本t检验,不符合正态分布的计量资料用M(P₂₅,P₇₅)描述,两组间比较采用Mann-Whitney U 检验。组内手术前后比较:差值服从正态分布则采用配对样本t检验,不服从正态分布则采用Wilcoxon 符号秩检验。计数资料采用n(%)描述,采用χ² 检验或Mann-Whitney U 检验,多元线性回归分析影响总角膜ΔJ0的因素。以P<0.05为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 两组患者术前资料比较 本研究共纳入ICL/TICL 植入术的患者162例162眼,上方切口组75例75眼,颞侧切口组87例87眼。术后失访8例,失访率为4.9%。实际完成随访者为154例154眼,其中上方切口组72例72眼,颞侧切口组82例82眼。两组年龄、性别分布、术前总

角膜散光以及总角膜散光分组比较,差异无统计学意义(均P>0.05),见表1。

2.2 两组术后角膜散光参数的变化特征 两组患者术后3 mo多项角膜参数与术前相比均发生显著变化(均P<0.001)。上方切口组术后3 mo 总角膜J0及前表面J0较术前向正值方向转变,表明角膜散光呈逆规化改变(差值分别为0.146±0.108、0.199±0.117 D),而后表面J0向负值方向转变,表明角膜后表面散光呈顺归化改变(差值为-0.050±0.022 D)。相反,颞侧切口组术后3 mo 总角膜J0及前表面J0较术前负值化转变(差值分别为-0.109±0.126 D、-0.128±0.129 D),后表面J0值则正值化转变(差值为0.031±0.037 D),见表2,图2、3。

2.3 影响总角膜ΔJ0的多元线性回归分析 采用多元线性回归分析探讨影响总角膜ΔJ0的因素。模型整体具有显著的统计学意义(F=488.545,P<0.001),调整后R²为0.943,D-W=2.210,表明模型能解释总角膜ΔJ0变异的94.3%,拟合优度极佳。最终得到的回归方程为:总角膜ΔJ0=-0.034+0.968×前表面ΔJ0+1.018×后表面ΔJ0,分析结果显示:前表面ΔJ0是影响总角膜ΔJ0的最主要因素,其非标准化回归系数(B)为0.968(P<0.001),表明前表面J0每变化1.00 D,总角膜J0平均变化0.968 D。后表面ΔJ0对总角膜ΔJ0也具有显著影响,其非标准化回归系数(B)为1.018(P<0.001)。切口位置的主效应(B=0.046,

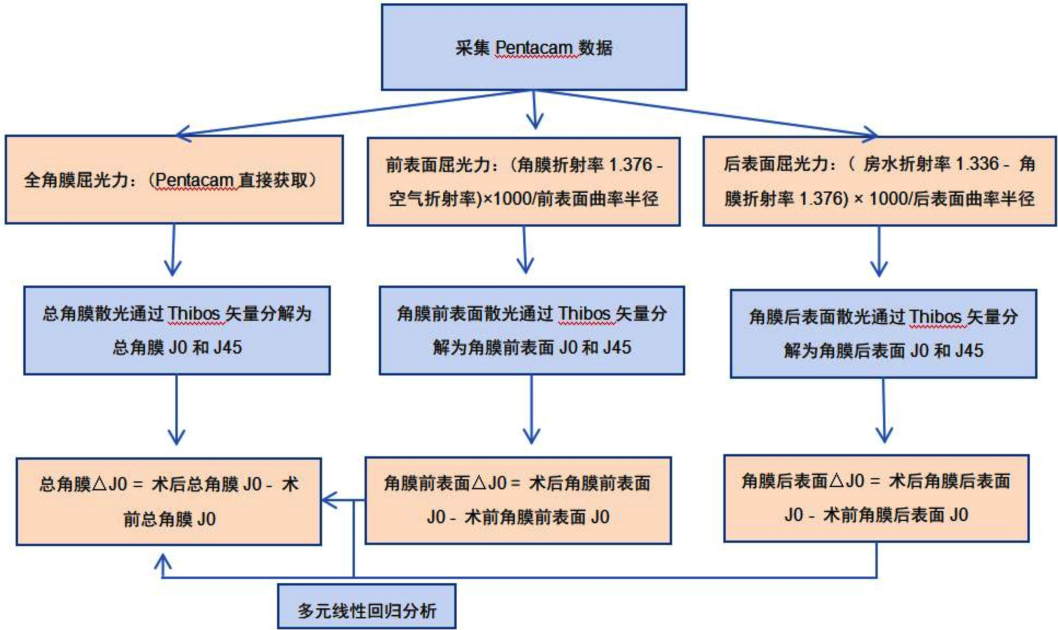


图1 技术路线图。

表1 上方切口组与颞侧切口组患者基线特征比较

组别	n	年龄($\bar{x}\pm s$,岁)	性别(例,%)		术前总角膜散光($\bar{x}\pm s$,D)	总角膜散光分组(眼,%)		
			男	女		低度组(≤1.0 D)	中度组(>1.0 且<2.0 D)	高度组(≥2.0 D)
上方切口组	72	25.96±6.17	17(23.6)	55(76.4)	1.41±0.63	26(36.1)	34(47.2)	12(16.7)
颞侧切口组	82	27.79±6.47	20(24.4)	62(75.6)	1.25±0.77	38(46.3)	28(34.2)	16(19.5)
t/χ ² /Z		-1.793	0.013		1.394	-0.772		
P		0.07	0.91		0.165	0.440		

注:上方切口组预期残留顺规散光的患者选择上方切口;颞侧切口组预期残留逆规散光的患者选择颞侧切口。

$P=0.129$) 及其与前表面 $\Delta J0$ 的交互项 ($B=-0.017, P=0.776$)、后表面 $\Delta J0$ 的交互项 ($B=-0.044, P=0.876$) 均无统计学意义。该结果证实,总角膜 $\Delta J0$ 的量值主要由角膜前、后表面的 $\Delta J0$ 共同线性决定,其中前表面 $\Delta J0$ 占主导地位,其标准化回归系数约为后表面 $\Delta J0$ 的 4 倍(前表面 $\Delta J0 \beta$ 值:1.137,后表面 $\Delta J0 \beta$ 值:0.297),而切口位置本身并非总角膜 $\Delta J0$ 的独立预测因子,见表 3。

2.4 敏感性分析 为评估后表面 $\Delta J0$ 对总角膜 $\Delta J0$ 的影响是否独立于前表面 $\Delta J0$ 的贡献,本研究进行了敏感性分析。以“总角膜 $\Delta J0$ 减去前表面 $\Delta J0$ ”后的残差值为因变量,以“后表面 $\Delta J0$ ”为自变量构建简单线性回归模型。结果显示,该模型调整后 R^2 为 0.779,后表面 $\Delta J0$ 的回归系数为 0.980 (95% CI:0.897–1.063, $P<0.001$),其 95% 置信区间包含理论预期值 1.0。剥离前表面 $\Delta J0$ 的贡献后,后表面 $\Delta J0$ 对总角膜 $\Delta J0$ 残差变异的解释度达 77.9%,见表 4。

3 讨论

3.1 SIA 机制争议与矢量分析的必要性 散光是一种常见的屈光不正状态,可导致视物模糊、重影、对比敏感度下降及视疲劳等多种视觉障碍。流行病学调查显示,散光在中年人群中普遍存在。例如,Yang 等^[10]的研究发现,中国中年人群中散光 ($>0.5\text{ D}$) 的检出率高达 68.73%,且以顺规散光为主(88.15%)。对于中高度散光患者,植入 TICL 已成为一种有效的矫正方案。然而,TICL 植入手术需要通过角膜切口进行,该切口不可避免地引起角膜形态与曲率发生改变,即产生 SIA,这是导致术后散光残留、影响视觉

质量的重要原因。SIA 的形成机制可归结为三点:角膜切口所致的局部曲率平坦化、对侧子午线的代偿性陡峭化,以及切口愈合过程中产生的扭矩效应^[6]。其中,扭矩效应具有较大的不确定性,而角膜前、后表面在“平坦化–陡峭化”这一核心过程中的具体贡献与机制,目前仍存在学术争议。

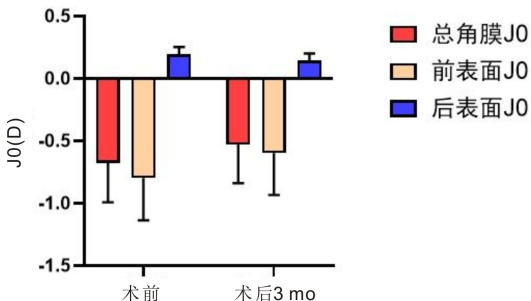


图2 上方切口组角膜参数变化。

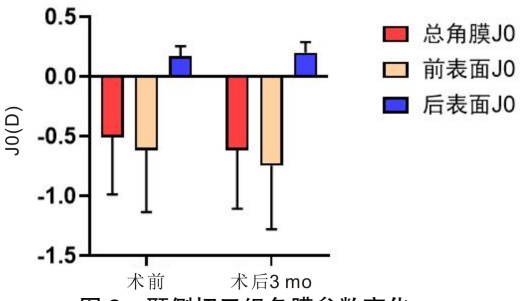


图3 颞侧切口组角膜参数变化。

表 2 两组患者手术前后角膜参数的比较 (x̄±s, D)

参数	组别	术前	术后 3 mo	差值	t	df	P
总角膜 J0	上方切口组	-0.676±0.317	-0.530±0.309	0.146±0.108	11.531	71	<0.001
	颞侧切口组	-0.510±0.480	-0.619±0.490	-0.109±0.126	-7.891	81	<0.001
前表面 J0	上方切口组	-0.797±0.341	-0.597±0.337	0.199±0.117	14.489	71	<0.001
	颞侧切口组	-0.620±0.517	-0.748±0.533	-0.128±0.129	-8.966	81	<0.001
后表面 J0	上方切口组	0.193±0.060	0.142±0.059	-0.050±0.022	-19.365	71	<0.001
	颞侧切口组	0.170±0.083	0.200±0.087	0.031±0.037	7.532	81	<0.001

注:上方切口组预期残留顺规散光的患者选择上方切口;颞侧切口组预期残留逆规散光的患者选择颞侧切口。

表 3 影响总角膜 $\Delta J0$ 的多元线性回归分析(含交互作用模型)

参数	B	标准误	t	β	P	共线性统计		B 的 95%CI	
						容忍度	VIF	下限	上限
(常量)	-0.034	0.014	-2.429		0.015			-0.062	-0.007
前表面 $\Delta J0$	0.968	0.039	24.821	1.137	<0.001	0.180	5.554	0.890	1.046
后表面 $\Delta J0$	1.018	0.137	7.431	0.297	<0.001	0.241	4.141	0.748	1.289
组别(0=颞侧切口,1=上方切口)	0.046	0.030	1.533	0.066	0.129	0.207	4.831	-0.013	0.105
组别×前表面 $\Delta J0$ 交互项	-0.017	0.061	-0.279	-0.013	0.776	0.193	5.174	-0.138	0.103
组别×后表面 $\Delta J0$ 交互项	-0.044	0.284	-0.155	-0.007	0.876	0.172	5.825	-0.605	0.517

注:VIF<10 提示无严重多重共线性。

表 4 后表面 $\Delta J0$ 对总角膜 $\Delta J0$ 的独立贡献验证(敏感性分析)

模型	因变量	自变量	调整后 R^2	B(95%CI)	P
原模型	总角膜 $\Delta J0$	前表面 $\Delta J0$ +后表面 $\Delta J0$	0.943		<0.001
敏感性模型	总角膜 $\Delta J0$ -前表面 $\Delta J0$	后表面 $\Delta J0$	0.779	0.980(0.897–1.063)	<0.001

注:敏感性分析中后表面 $\Delta J0$ 的回归系数接近 1.0(理论预期值为 1.0),提示后表面测量值与残差值之间具有良好的线性对应关系,进一步验证了角膜前后表面测量数据在矢量合成层面上的内部一致性。剥离数学耦合后,后表面 $\Delta J0$ 对残差的解释度仍达 77.9%,提示其对总角膜 $\Delta J0$ 的影响超出单纯的公式关系。

为精确解析 SIA 的矢量构成并探究上述争议,本研究引入 Thibos 屈光力矢量分析法。该方法将散光分解为两个正交的 Jackson 交叉柱镜分量 J0 和 J45(计算公式: $J_0 = (C/2) \times \cos(2\theta)$, $J_{45} = (C/2) \times \sin(2\theta)$;其中 C 为散光度, θ 为轴位), J0 分量表征 90°/180°子午线方向的屈光力差异。鉴于本研究所有手术切口均位于水平(180°)或垂直(90°)方向, SIA 主要表现为 J0 方向的变化,因此,通过计算 ΔJ_0 ,即可量化评估由平坦化/陡峭化效应产生的 SIA 矢量成分(ΔJ_0 为正值表示逆规化改变,负值表示顺规化改变,其散光度等效值为 $2|\Delta J_0|$)。

为进一步区分角膜前、后表面对 SIA 的贡献,本研究以全角膜屈光力(TCRP)作为评估金标准。TCRP 基于光线追踪原理,综合了角膜前后表面曲率、真实折射率、角膜厚度及非球面性等因素,能更精确地反映角膜的整体光学特性^[11-17]。通过分别计算角膜前表面屈光力与后表面屈光力的变化量,并分析其与 TCRP 变化量之间的比例关系,可定量评估角膜前、后表面在 SIA 形成中的相对作用,从而为澄清学术争议、优化手术方案提供依据。

3.2 切口位置决定 SIA 的矢量方向并印证经典理论 如表 1 所示,两组患者在年龄、性别、术前散光度及散光分布上均无统计学差异,基线资料具有可比性,提示组间差异主要源于手术切口位置的不同。表 2 的配对样本 *t* 检验结果揭示了一种典型的“镜像效应”:上方切口组术后,总角膜及前表面的 J0 值均向正值方向(逆规化)发生显著变化,而后表面 J0 值向负值方向(顺规化)改变;与之相反,颞侧切口组的总角膜及前表面 J0 值均向负值方向(顺规化)显著变化,后表面 J0 值则向正值方向(逆规化)改变。尽管后表面 J0 的变化方向在一定程度上抵消了前表面的改变,但总角膜 J0 的净变化仍主要受前表面 J0 主导。这一发现与经典的角膜切口力学理论高度吻合:上方切口使垂直子午线(90°方向)相对平坦化,水平子午线(180°方向)相对陡峭化,导致 J0 正向移动(逆规化改变);而颞侧切口则使水平子午线平坦化,垂直子午线陡峭化,引起 J0 负向移动(顺规化改变)^[18-22]。本研究从角膜前表面、后表面至全角膜层面,为这一理论提供了完整的矢量证据链。

3.3 前后表面贡献的量化及前表面主导后表面积极参与特征 本研究通过多元线性回归模型量化了前后表面 ΔJ_0 与总角膜 ΔJ_0 的关联程度。数据显示,前表面 ΔJ_0 是总角膜 SIA 的最主要关联因素($\beta = 1.137, P < 0.001$),这与传统认知一致。同时,后表面 ΔJ_0 也在回归模型中表现出显著贡献($\beta = 0.297, P < 0.001$),提示其后表面变化与总角膜 SIA 之间存在统计学上显著的相关性。然而,需注意总角膜屈光力本身在光学上即由前后表面共同构成,回归模型中的高拟合优度(调整 $R^2 = 0.943$)在一定程度上反映了这种固有的数学耦合。为剥离这一影响,敏感性分析(表 4)显示,在剥离前表面贡献后,后表面 ΔJ_0 对残差的解释度仍达 77.9%(调整 $R^2 = 0.779$),支持后表面 ΔJ_0 与总角膜 ΔJ_0 之间的关联超出了纯粹的公式推导关系。这一发现为调和既往研究中关于角膜后表面术后变化的矛盾结论提供了新的视角。例如, Kaushik 等^[7]发现术后后表面曲率发生显著改变,而 Sheoran 等^[8]和 Xiao 等^[23]的研究则报道后表面无显著差异。这些不一致的结果可能源于研究方法(如测量仪器、观察时间点)和样本量的差异。更重要的是,本研究采用的 Thibos 矢量分析法能够敏感地捕捉到后表面 J0 的细微但具有规律性的变化,而单纯比

较平均曲率(Km)或单一子午线曲率(K1/K2)可能不足以揭示这种方向性的改变。同样, Wan 等^[24]发现前后表面平均曲率无差异,但颞侧切口 SIA 小于上方切口,这提示平均曲率的变化可能掩盖了 J0 的特异性改变,而后者正是本研究的关注焦点。综合以上分析,我们的结果从矢量变化的层面为“后表面参与 SIA 构成”提供了统计学支持证据。

3.4 前后表面 SIA 的矢量方向特征与切口位置的关联 回归分析还揭示,切口位置本身在排除前后表面影响后,并非总 SIA 大小的独立预测因子。这表明,切口位置的作用已完全转化为对前后表面 SIA 方向的诱导。因此, SIA 的形成可被理解为:切口位置决定了 SIA 的“方向”,而前后表面的协同变化则决定了 SIA 的“量值”,这一模型有助于解释一些看似矛盾的临床观察。Wei 等^[25]发现颞侧与上方切口的 TCRP 松解作用无差异,而 Wan 等^[24]则报告颞侧切口 SIA 更小。本研究的结果表明,这种“松解作用”的差异可能并非源于切口位置本身对总 SIA 的直接影响,而是通过其诱导出的前后表面 SIA 的特定组合来实现的。我们的模型显示,颞侧切口诱导的后表面变化(ΔJ_0 为正)对前表面的变化(ΔJ_0 为负)有抵消趋势(表 2),这可能是导致某些研究中其净 SIA 量值较小的原因。这一发现凸显了在评估切口效果时,分别考量其对前后表面的特异性生物力学效应的重要性,而非仅仅关注最终的总和结果。这一整合模型对临床实践具有重要指导意义:术者应充分利用切口位置进行个性化设计,同时,未来开发更精准的 SIA 预测公式时,必须纳入后表面的贡献,以克服传统模型仅基于前表面的局限性,从而实现更优的散光矫正效果。

3.5 研究局限性与未来展望 尽管本研究为前瞻性设计,并采用了精确的矢量分析方法,但仍存在一些局限性:(1)本研究为单中心、非随机的前瞻性观察性研究,切口位置依据术前预期残留散光情况进行个体化选择,而非随机分配,可能存在选择偏倚,组间可比性虽在主要基线参数上得到确认,但仍有未知或未测量的混杂因素可能影响结果。(2)本研究样本量有限,且未设独立的外部验证队列,结论的普适性有待多中心、大样本研究进一步验证。(3)随访时间仅为术后 3 mo,尚不能判断 SIA 是否达到最终稳定,也无法评估切口愈合、角膜生物力学重塑及长期视觉质量的演变趋势。(4)研究未纳入角膜生物力学直接测量指标(如 Corvis ST 参数),未能从力学角度独立验证前后表面在 SIA 形成中的作用。(5)研究结局主要聚焦于角膜屈光参数层面的矢量变化,缺少裸眼视力、最佳矫正视力、主观验光残余散光及患者满意度等临床结局指标,因此本研究结论仅限于角膜光学参数变化的描述与分析,尚不能直接推断其对患者视觉质量和临床获益的实际影响。因此,上述结论应视为术后 3 mo 的短期观察结果,未来需通过多中心、随机对照、长期随访并结合生物力学测量与临床结局指标的研究设计加以验证。(6)本研究未采用 Alpins 矢量分析法及双角图对散光数据进行分析。Alpins 矢量分析法主要用于评估散光矫正手术的准确性,其核心参数(目标诱导散光向量 TIA、手术源性散光向量 SIA、差异向量 DV 等)均围绕“预期矫正量”与“实际矫正量”的比对而设计;双角图则侧重于直观展示散光矢量的群体分布趋势与离散程度。本研究旨在定量分析不同切口位置下角膜前、后表面 ΔJ_0 与总角膜 ΔJ_0 之间的关联权

重,而非评价散光矫正的准确性或预测精度,因此上述方法与本研究的设计目的不完全匹配。然而,双角图作为SIA 矢量分布的可视化手段,对本研究结果的可视化展示具有一定补充价值,未来研究中可考虑纳入以更全面地呈现数据特征。

本研究系统评估了不同切口位置 ICL 植入术后 3 mo 角膜 SIA 的矢量变化特征,得出以下结论:切口位置决定 SIA 的矢量方向。上方切口诱导以逆规散光为主的 SIA 矢量,颞侧切口诱导以顺规散光为主的 SIA 矢量。角膜前、后表面协同参与 SIA 的构成。前表面 ΔJ_0 是总角膜 ΔJ_0 的最主要关联因素,后表面 ΔJ_0 亦表现出统计学上显著的关联。切口位置对总 SIA 量值无直接独立影响,其作用通过诱导前后表面产生特定方向的 SIA 变化而实现。综上,本研究从矢量分析角度量化了不同切口位置下角膜前、后表面 SIA 的分布特征及构成比例。但本研究为单中心、非随机设计,且随访仅 3 mo,上述结论为术后短期观察结果,其长期稳定性及临床意义尚需进一步研究验证。

利益冲突声明: 本文不存在利益冲突。

作者贡献声明: 赵王华论文选题与修改,初稿撰写;许兰花数据采集、分析、核对;陈霞数据采集、分析、核对;黄舒甜文献检索;朱良勇选题指导,论文修改及审阅。所有作者阅读并同意最终的文本。

参考文献

[1] Alarfaj G, AlSubaie M, Hariri J, et al. Posterior chamber phakic intraocular lens adjustment - causes and complications; a retrospective cohort study. *Int J Ophthalmol*, 2025,18(5):883-888.

[2] 赵王华, 黄舒甜, 许兰花, 等. 影响 ICL 植入术后总角膜术源性散光的因素分析. *国际眼科杂志*, 2026,26(3):540-545.

[3] 张慧敏, 郭明义, 单玉琴, 等. 年龄相关性白内障患者多焦点人工晶体植入术后远期视觉质量分析. *河南医学研究*, 2026,35(2):292-297.

[4] Ye LY, Li SF, Zuo JJ, et al. Effect of low-degree astigmatism on the objective visual quality. *Int J Ophthalmol*, 2024,17(6):1086-1093.

[5] 马晓婷, 李科军, 赵智华, 等. 区域折射型人工晶状体植入术后角膜残余散光对患者视觉质量的影响. *眼科新进展*, 2024,44(1):43-47.

[6] Alpíns NA. Vector analysis of astigmatism changes by flattening, steepening, and torque. *J Cataract Refract Surg*, 1997, 23 (10): 1503-1514.

[7] Kaushik J, Singh A, Bhatta S, et al. Posterior keratometry changes after steep axis phacoemulsification; a prospective study. *Rom J Ophthalmol*, 2023,67(3):275-282.

[8] Sheoran K, Arya SK, Bansal RK, et al. Surgically induced astigmatism and posterior corneal curvature changes following phacoemulsification. *Indian J Ophthalmol*, 2022,70(2):406-412.

[9] Thibos LN, Wheeler W, Horner D. Power vectors: an application of Fourier analysis to the description and statistical analysis of refractive error. *Optom Vis Sci*, 1997,74(6):367-375.

[10] Yang S, Jiang Y, Cui G, et al. Age - and gender - related characteristics of astigmatism in a myopic population. *Front Med*, 2022, 9:1011743.

[11] Lischke R, Shajari M, Feucht N, et al. OCT- versus scheimpflug-based total corneal power measurements changes in myopic astigmatic SMILE procedures. *Curr Eye Res*, 2022,47(1):12-17.

[12] Fang XL, Yu CX, Xue WW, et al. Comparison of corneal power assessment methods for true corneal power after myopic small-incision lenticule extraction. *Am J Ophthalmol*, 2025,275:156-163.

[13] Lischke R, Mayer WJ, Feucht N, et al. Total keratometry for determination of true corneal power after myopic small-incision lenticule extraction. *J Cataract Refract Surg*, 2021,47(10):1285-1289.

[14] Li XC, Cao XG, Bao YZ. Comparison of total corneal astigmatism between IOLMaster and pentacam. *BioMed Res Int*, 2022, 2022: 9236006.

[15] Pan C, Chen D, Liu Y, et al. A novel analysis of Scheimpflug total corneal refractive power following corneal cross - linking in mild to moderate keratoconus. *Int J Ophthalmol*, 2022,15(5):728-735.

[16] Wang ZY, Yang WL, Liu Q, et al. Comparison of total corneal power measurements obtained with different devices after myopic keratorefractive surgery. *Int J Ophthalmol*, 2023,16(7):1117-1122.

[17] Owusu S, Zaabaar E, Kwarteng M, et al. Scheimpflug - derived keratometric, pachymetric and pachymetric progression indices in the diagnosis of keratoconus: a systematic review and meta-analysis. *OPHTH*, 2023,17:3941-3964.

[18] Raman R, Prasad S, Jerrome S, et al. The effect of incision site on surgically induced astigmatism in manual small incision cataract surgery: a systematic review and meta - analysis. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2026,264(4):1003-1016.

[19] 牛玉坤, 王志猛, 魏文艳, 等. ICL 植入术平轴角膜切口对全角膜屈光力和术源性散光的影响. *中华眼视光学与视觉科学杂志(中英文)*, 2026,28(2):124-130.

[20] 陈海威, 刘冬梅, 毕宏生, 等. 白内障手术中陡峭轴透明角膜切口所致术源性散光的长期临床研究. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2023,25(1):33-37.

[21] Huang T, Bao SY, Li K. Clinical effects observation of ICL implantation with personalized surgically induced astigmatism for correcting low to moderate astigmatism with myopia in patients. *J Ophthalmol*, 2025,2025:6649909.

[22] Kamiya K, Kono Y, Takahashi M, et al. Comparison of simulated keratometry and total refractive power for keratoconus according to the stage of amsler-krumeich classification. *Sci Rep*, 2018,8:12436.

[23] Xiao YH, Liu YQ, Chen ZG. Changes in corneal curvature and astigmatism in senile cataract patients after phacoemulsification. *Front Med*, 2024,11:1481285.

[24] Wan T, Chen HC, Wu SR, et al. Analysis of surgically induced astigmatism of the anterior, posterior, and total Cornea after implantable collamer lens implantation; a comparative study between temporal and superior clear corneal incisions. *BMC Ophthalmol*, 2024,24(1):252.

[25] Wei RY, Liu ST, Cheng MR, et al. Incision-related astigmatism on the anterior and total Cornea after implantable collamer lens implantation. *Indian J Ophthalmol*, 2024,72(Suppl 5):S741-S745.