

DOI:10.16781/j.CN31-2187/R.20220859

· 论 著 ·

屈光度对飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术后眼压的预测和校正

张鹏程, 韩 杨, 江文珊*, 吴金桃, 徐 赤

中国人民解放军中部战区总医院眼科, 武汉 430000

[摘要] **目的** 探究飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术 (SMILE) 治疗后眼压的预测和校正。**方法** 采用回顾性研究+前瞻性研究设计。纳入2019年12月至2021年12月于我院眼科行SMILE的患者90例(180眼), 随机抽取30眼为验证集, 余150眼为训练集。前瞻性选择2022年1—9月于我院行SMILE治疗的患者51例(102眼)为测试集。分析训练集术前3d及术后1周、1个月、3个月、6个月的眼压情况, 确定眼压稳定期及与术前相比的眼压变化量(ΔIOP)。选取术前球柱镜代数和(SC)、球镜度、柱镜度、眼压、中央角膜厚度(CCT)、平均角膜曲率[Km, 平坦角膜曲率(K1)与陡峭角膜曲率(K2)的平均值]、前房深度(ACD)与各参数在眼压稳定时相对术前的变化量(ΔCCT 、 ΔKm 、 $\Delta K1$ 、 $\Delta K2$ 、 ΔACD)及个体因素, 纳入与 ΔIOP 相关的因素采用多元线性回归拟合回归模型。建立适合临床SMILE术后眼压预测及校正的公式并进行效能验证。**结果** SMILE术后眼压均较术前降低, 术后1周、3个月及6个月3个时间点之间眼压差异无统计学意义, 而术后1个月与其余时段相比眼压差异均有统计学意义(P 均 <0.05)。拟合出的最佳回归方程为 $\Delta IOP=0.459 \times \text{术前眼压 (mmHg)} - 0.183 \times SC (D) - 0.041 \times \text{年龄 (岁)} + 1.292 \times \Delta ACD (mm) - 1.270$ (调整 $R^2=0.533$, $P<0.001$)。仅纳入术前眼压和SC, 拟合出简化方程为 $\Delta IOP=0.496 \times \text{术前眼压 (mmHg)} - 0.194 \times SC (D) - 2.952$ (调整 $R^2=0.498$, $P<0.001$); 通过四舍五入法及截距校正推演得出预测和校正公式分别为: 术后预测眼压 (mmHg) = $0.5 \times \text{术前眼压 (mmHg)} + 0.2 \times SC (D) + 3$, 术后校正眼压 (mmHg) = $\text{术后眼压 (mmHg)} + 0.5 \times \text{术前眼压 (mmHg)} - 0.2 \times SC (D) - 3$ 。经内部验证与外部测试, 简化公式的预测性能良好。**结论** SMILE术后3个月眼压趋于稳定, 且 ΔIOP 与屈光度相关。SMILE术后眼压可通过简化公式进行快速临床预测和校正。

[关键词] 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术; 眼压; 屈光度; 校正

[中图分类号] R 779.63 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-1338(2023)05-0576-07

Role of diopter in prediction and correction of intraocular pressure after small incision lenticule extraction

ZHANG Peng-cheng, HAN Yang, JIANG Wen-shan*, WU Jin-tao, XU Chi

Department of Ophthalmology, General Hospital of Central Theater Command of PLA, Wuhan 430000, Hubei, China

[Abstract] **Objective** To explore the prediction and correction methods of postoperative intraocular pressure (IOP) after small incision lenticule extraction (SMILE). **Methods** In this retrospective and prospective study, 90 patients (180 eyes) who underwent SMILE in the ophthalmology department of our hospital from Dec. 2019 to Dec. 2021 were enrolled. From them, 30 eyes were selected randomly as validation set, and the remaining 150 eyes were included as training set. A prospective selection of 51 patients (102 eyes) who received SMILE from Jan. to Sep. 2022 was included as test set. Firstly, IOP of the training set was analyzed 3 d before surgery, 1 week, 1 month, 3 months and 6 months after surgery to determine the IOP-stable phase and the amount of change in IOP (ΔIOP). Then, preoperative algebraic sum of spherocylinder (SC), spherical diopter, diopter of cylinder, IOP, central corneal thickness (CCT), mean corneal curvature (Km, the mean of flat corneal curvature [K1] and steep corneal curvature [K2]), anterior chamber depth (ACD), amount of change of each parameter in postoperative IOP stability (ΔCCT , ΔKm , $\Delta K1$, $\Delta K2$, and ΔACD), and individual factors were selected, and the factors associated with ΔIOP were subsequently incorporated into the regression models. Finally, formulas suited for prediction and correction of IOP after clinical SMILE were developed and validated for efficacy. **Results** The postoperative IOP was all decreased after SMILE. There were no significant differences among 1-week, 3-month or 6-month postoperative IOP, but the differences of IOP between 1 month and the rest of time periods were statistically significant (all

[收稿日期] 2022-11-04 **[接受日期]** 2022-12-22

[作者简介] 张鹏程, 硕士, 主治医师. E-mail: zhangpengcheng@126.com

*通信作者 (Corresponding author). Tel: 027-50772553, E-mail: wenshanj@126.com

$P < 0.05$). Factors were selected and the following best regression equation was established: $\Delta IOP = 0.459 \times IOP_{\text{preoperative}}$ (mmHg) $- 0.183 \times SC$ (D) $- 0.041 \times \text{age}$ (year) $+ 1.292 \times \Delta ACD$ (mm) $- 1.270$ (adjusted $R^2 = 0.533$, $P < 0.001$). Preoperative IOP and SC were included only, the simplified equation was: $\Delta IOP = 0.496 \times IOP_{\text{preoperative}}$ (mmHg) $- 0.194 \times SC$ (D) $- 2.952$ (adjusted $R^2 = 0.498$, $P < 0.001$). Predictive and adjusted formulas obtained through rounding and intercept correction were as follows: $IOP_{\text{postoperative}}$ (predicted) (mmHg) $= 0.5 \times IOP_{\text{preoperative}}$ (mmHg) $+ 0.2 \times SC$ (D) $+ 3$, $IOP_{\text{postoperative}}$ (corrected) (mmHg) $= IOP_{\text{postoperative}}$ (mmHg) $+ 0.5 \times IOP_{\text{preoperative}}$ (mmHg) $- 0.2 \times SC$ (D) $- 3$. After internal validation and external testing, the prediction performance of the simplified formulas was good. **Conclusion** The IOP tends to stabilize at 3 months after SMILE, and the ΔIOP is correlated with diopter. Postoperative IOP can be rapidly predicted and corrected using simplified formulas.

[**Key words**] small incision lenticule extraction; intraocular pressure; diopter; correction

[Acad J Naval Med Univ, 2023, 44(5): 576-582]

飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术 (small incision lenticule extraction, SMILE) 安全、有效、稳定且具有可预测性^[1], 其并非眼内手术, 理论上对房水循环、眼内容物等影响甚微, 因此非接触眼压计 (non-contact tonometer, NCT) 所测的术后眼压偏低, 并非真实眼压 (intraocular pressure) 的反映。SMILE 改变了中央角膜厚度 (central corneal thickness, CCT)、角膜曲率及角膜生物力学等^[2], 糖皮质激素的使用也会对术后早期眼压造成一定影响^[3], 因此术后眼压的准确预测和校正极为重要。曾有学者开展相关研究, 但多数仅考虑自身角膜因素, 且给出的模型自变量较多、需要调取详细数据、使用依从性差^[4-5], 不利于临床应用与推广。本研究通过分析 SMILE 术后眼压的变化规律, 充分考虑各因素拟合最佳回归模型, 并从屈光度入手推演得到简化公式, 以期利用该简化公式及时且准确地预测和校正动态眼压, 避免青光眼漏诊并协助指导术后用药。

1 资料和方法

1.1 病例资料 采用回顾性研究+前瞻性研究设计。纳入 2019 年 12 月至 2021 年 12 月于我院眼科接受 SMILE 治疗的患者 90 例 (180 眼), 其中男 51 例 (56.7%)、女 39 例 (43.3%), 年龄为 18~45 (26.13±6.97) 岁, 术后均无眼部并发症。采用随机数字表法抽取 30 眼作为内部验证集, 余 150 眼作为训练集用于模型构建。前瞻性选择 2022 年 1—9 月于我院行 SMILE 治疗的患者 51 例 (102 眼) 作为测试集。利用 G-power 3.1 软件分析重复测量研究所需样本量, 重复测量次数为 5, 预设存在中等效应量 $f = 0.25$, 统计检验力 $1 - \beta = 0.9$, 显著性水平 $\alpha = 0.05$, 组内相关系数为 0.5,

非球形校正 $\varepsilon = 0.25$, 结果显示至少需要 70 眼。样本量与纳入线性回归分析的自变量 (9 个) 比例至少为 10 : 1, 因此样本量至少 90 眼。估计脱落率 10%, 本研究纳入训练集样本量为 150 眼。本研究遵循赫尔辛基宣言并通过我院伦理委员会审批, 所有患者均签署知情同意书。

纳入标准: (1) 年龄为 18~45 岁, 有手术意愿; (2) 球镜度为 $-10.00 \sim -1.00$ D 且柱镜度 < 5.00 D; (3) 近 2 年屈光度变化 ≤ 0.5 D/年; (4) 角膜曲率为 39.0~48.0 D、角膜厚度 $> 460 \mu\text{m}$ 且预测残余基质床厚度 $\geq 280 \mu\text{m}$; (5) 术前眼压 ≤ 21 mmHg (1 mmHg = 0.133 kPa), 或 ≤ 25 mmHg 但角膜厚度 $\geq 600 \mu\text{m}$ 。排除标准: (1) 术前角膜厚度正常而眼压 > 21 mmHg, 或可疑青光眼、视野缺损、杯盘比 > 0.4 或双眼差值 > 0.2 ; (2) 有眼部活动性感染或炎症性病变; (3) 有严重干眼症、亚临床或临床期圆锥角膜、眼险异常、角膜不透明瘢痕、白内障或眼底病等; (4) 有全身性疾病如糖尿病、结缔组织病、自身免疫病或瘢痕体质者; (5) 期望值过高或精神异常者。

1.2 检查及手术方法 手术前行裸眼视力、最佳矫正视力、综合验光、NCT、裂隙灯显微镜、角膜地形图、散瞳验光及眼底检查等, 并于术后 1 周、1 个月、3 个月、6 个月复查。使用 ARK-1 型电脑验光仪 (日本 NIDEK 公司) 进行综合验光; 使用 NT-2000 型 NCT (日本 Canon 公司) 测量眼压 3 次/眼, 测值间相差 < 3 mmHg 后取平均值; 使用 Pentacam 三维眼前节分析仪 (德国 OCULUS 公司) 于暗室内获取平坦角膜曲率 (flat corneal curvature, K1)、陡峭角膜曲率 (steep corneal curvature, K2)、CCT, 图像质量至 “OK” 时数据方可纳入。计算平均角膜曲率 (mean corneal

curvature, Km)、眼压变化量(amount of change in intraocular pressure, Δ IOP)、 Δ CCT、 Δ Km、 Δ K1、 Δ K2, 其中Km为K1和K2的平均值, Δ IOP、 Δ CCT、 Δ Km、 Δ K1及 Δ K2分别为术后眼压稳定时所测结果与术前相比的变化值。手术光学区为6.0~6.5 mm,角膜帽直径为7.00或7.50 mm (>透镜1 mm),角膜帽厚度为110~120 μ m;弧形小切口位置为颞上方45°或135°的角膜帽边缘,切口长2 mm,透镜边切及小切口侧切角度均设为90°。手术均由同一技术娴熟的副主任医师完成。

1.3 研究设计 首先分析训练集的眼压情况,确定 Δ IOP;随后选取术前球镜度、柱镜度、球柱镜代数和(algebraic sum of sphero-cylinder, SC)、眼压、CCT、Km、前房深度(anterior chamber depth, ACD),眼压稳定时各参数的变化量(Δ CCT、 Δ Km、 Δ K1、 Δ K2、 Δ ACD),以及个体因素(年龄、性别、眼别)等指标,纳入其中与 Δ IOP存在相关性的因素拟合最佳及简化回归模型。依据SC程度(≥ -3.00 D、 $-6.00 \sim < -3.00$ D、 < -6.00 D)将训练集研究对象分为低、中、高度3组,分析并比较各组眼压的波动,建立适合临床SMILE术后眼压预测及校正的简化公式。将预测公式分别代入验证集(30眼)和测试集(102眼)进行预测效能的内部验证和外部测试。

1.4 统计学处理 应用SPSS 22.0软件进行统计学分析。采用Shapiro-Wilk检验对计量资料进行正态性检验,呈正态分布的资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,不同时段所测数据的比较采用重复测量方差分析,多重比较采用Bonferroni法;不同性别、眼别间资料的比较采用独立样本 t 检验;预测值与实测值的比较采用配对 t 检验;采用Pearson相关分析进行关联性分析;采用多元线性回归模型分析各自变量与因变量间的因果联系并拟合回归方程,通过Durbin-Watson检验分析模型是否存在自相关性,以方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)判断变量间的共线性水平,通过 β 系数度量各变量的权重。检验水准(α)为0.05。

2 结果

2.1 SMILE术后眼压的变化 经箱线图分析,数据无异常值;Shapiro-Wilk检验显示计量资料均

服从正态分布($P > 0.05$);经Mauchly's球形假设检验,因变量的方差协方差矩阵不相等($\chi^2 = 22.148$, $P = 0.001$),采用Huynh-Feldt方法进行校正($\epsilon = 0.961$)。校正后 $F(3.845, 688.314) = 811.341$, $P < 0.001$,偏 $\eta^2 = 0.819$,即不同时段眼压差异具有统计学意义。训练集所有150眼的术前3 d及术后1周、1个月、3个月、6个月眼压分别为(16.82 ± 2.69)、(9.98 ± 1.87)、(10.87 ± 2.29)、(10.31 ± 1.97)和(10.23 ± 1.62) mmHg。

主体内对比检验结果 P 均 < 0.001 ,但线性 F 值最大(为1 258.944),提示眼压随时间呈线性变化;多重比较结果显示,SMILE术后眼压均较术前降低,术后1周、3个月及6个月3个时间点之间眼压差异无统计学意义($P_{1周-3个月} = 0.156$ 、 $P_{1周-6个月} = 0.707$ 、 $P_{3个月-6个月} = 1.000$),而术后1个月与其余时间点相比眼压差异均有统计学意义(P 均 < 0.05),表明术后1个月眼压仍有较大波动,术后3个月则趋于稳定,将术后3个月与术前眼压的差值(Δ IOP)作为因变量进行后续分析。

2.2 回归模型的建立与简化 训练集 Δ IOP为1.50~10.70 (6.57 ± 1.93) mmHg。分析各因素与 Δ IOP的关系显示,不同性别[男86例、女64例, (6.49 ± 2.00) mmHg vs (6.69 ± 1.85) mmHg]、不同眼别[右眼72例、左眼78例, (6.70 ± 1.96) mmHg vs (6.45 ± 1.91) mmHg]间 Δ IOP差异均无统计学意义($t = -0.638, 0.800$, $P = 0.524, 0.425$)。术前眼压、术前CCT、 Δ CCT、 Δ Km、 Δ K2、 Δ ACD均与 Δ IOP呈正相关,术前SC、球镜度及年龄则与 Δ IOP呈负相关(P 均 < 0.05 ,表1)。

纳入上述相关因素,经多元线性回归逐步法分析拟合出最佳回归方程,即 Δ IOP = $0.459 \times$ 术前眼压(mmHg) - $0.183 \times$ SC(D) - $0.041 \times$ 年龄(岁) + $1.292 \times$ Δ ACD(mm) - 1.270 ,其 $d = 1.846$,VIF均 < 2 ,拟合度良好且残差符合正态分布,调整 $R^2 = 0.533$, $F = 43.575$, $P < 0.001$ 。

$\beta_{\text{术前眼压}}$ 、 β_{SC} 、 $\beta_{\text{年龄}}$ 和 $\beta_{\Delta\text{ACD}}$ 分别为0.621、-0.163、-0.145及0.136,可见术前眼压和术前SC权重最大。术前SC与 Δ CCT、 Δ K2均呈负相关($r = -0.587, -0.587$, $P < 0.001$)。多因素重复测量方差分析显示,SC低、中、高度组间眼压变化趋势的差异有统计学意义[$F(7.790, 572.530) = 2.911$, $P = 0.004$,偏 $\eta^2 = 0.038$];与高度组相应时间点相比,

低度组术前眼压较低 ($t=-2.466, P=0.015$), 而中度组术后1周眼压较高 ($t=2.285, P=0.024$), 其余时间点3组间眼压差异均无统计学意义 ($P > 0.05$), 即术后1周高度组眼压发生大幅下降, 之后3组间差异缩小且变化不明显; 高度组眼压变化幅度较大, 且恢复过程中波动较明显 (表2)。

表1 接受 SMILE 治疗患者的 ΔIOP 与各影响因素间的相关性

Tab 1 Correlation between ΔIOP and each influencing factor in patients receiving SMILE

Factor	Mean, $\bar{x} \pm s$	Range	r	P value
Preoperative IOP/mmHg	16.90 \pm 2.62	11.50-23.5	0.689	<0.001
Preoperative SC/D	-5.89 \pm 1.72	-10.00- -2.25	-0.241	0.003
Preoperative spherical diopter/D	-4.89 \pm 1.56	-8.75- -1.75	-0.201	0.013
Preoperative cylindrical diopter/D	-1.00 \pm 0.75	-3.25-0.00	-0.135	0.100
Preoperative CCT/ μ m	542.97 \pm 29.66	433.00-606.00	0.320	<0.001
Preoperative Km/D	43.36 \pm 1.37	40.55-46.90	-0.106	0.196
Preoperative ACD/mm	3.21 \pm 0.24	2.74-4.05	0.045	0.581
Δ CCT/ μ m	90.89 \pm 25.34	12.00-144.00	0.282	<0.001
Δ Km/D	4.63 \pm 1.41	1.41-8.01	0.177	0.030
Δ K1/D	4.40 \pm 1.62	-0.40-7.71	0.140	0.087
Δ K2/D	4.86 \pm 1.47	2.01-8.80	0.186	0.023
Δ ACD/mm	0.05 \pm 0.20	-0.52-0.98	0.303	<0.001
Age/year	25.88 \pm 6.86	18.00-45.00	-0.255	0.002

1 mmHg=0.133 kPa. ΔIOP : Change of IOP; IOP: Intraocular pressure; SMILE: Small incision lenticule extraction; SC: Algebraic sum of sphero-cylinder; CCT: Central corneal thickness; Km: Mean corneal curvature; ACD: Anterior chamber depth; Δ CCT: Change of CCT; Δ Km: Change of Km; Δ K1: Change of flat corneal curvature; Δ K2: Change of steep corneal curvature; Δ ACD: Change of ACD.

表2 接受 SMILE 治疗的不同 SC 患者间各时段眼压比较

Tab 2 Comparison of intraocular pressure by time periods among different SC patients receiving SMILE

Group	n	Preoperative	1 week postoperative	1 month postoperative	3 months postoperative	6 months postoperative
Low	13	15.24 \pm 2.06*	10.12 \pm 1.46	10.04 \pm 1.89	9.84 \pm 1.83	9.63 \pm 1.34
Medium	66	16.95 \pm 2.73	10.34 \pm 2.04*	11.21 \pm 2.23	10.59 \pm 1.91	10.61 \pm 1.47
High	71	17.16 \pm 2.52	9.61 \pm 1.76	10.81 \pm 2.32	10.33 \pm 1.90	10.10 \pm 1.72

* $P < 0.05$ vs high group. 1 mmHg=0.133 kPa. SMILE: Small incision lenticule extraction; SC: Algebraic sum of sphero-cylinder.

仅纳入术前眼压和 SC, 拟合出简化回归方程: ΔIOP (mmHg) = $0.496 \times$ 术前眼压 (mmHg) - $0.194 \times$ SC (D) - 2.952, 其 $d=1.813$, VIF 均 = 1.010, 拟合度良好且残差符合正态分布, 调整 $R^2=0.498$, $F=74.793$, $P < 0.001$ (图1)。由于术前眼压和 SC 均存在取值范围, 通过四舍五入法及截距校正推演得出预测和校正公式: 术后预测眼压 (即术前眼压 - ΔIOP) (mmHg) = $0.5 \times$ 术前眼压 (mmHg) + $0.2 \times$ SC (D) + 3, 术后校正眼压 (即术后眼压 + ΔIOP) (mmHg) = 术后眼压 (mmHg) + $0.5 \times$ 术前眼压 (mmHg) - $0.2 \times$ SC (D) - 3。

2.3 模型的验证 将预测公式术后预测眼压 = $0.5 \times$ 术前眼压 + $0.2 \times$ SC + 3 代入验证集, 术后3个月眼压预测值为 (9.99 \pm 1.66) mmHg, 与实测值 [(10.19 \pm 2.30) mmHg] 比较差异无统计学意义 ($t=0.839, P=0.408$)。

随后通过此预测公式进行外部测试, 计算测试集的术后3个月眼压预测值为 (10.22 \pm 1.30) mmHg, 与实测值 (10.48 \pm 2.62) mmHg 比较差异亦无统计学意义 (两者差值的 95% CI -0.13 ~ 0.65, $t=1.326, P=0.188$; 图2), 表明该模型的预测性能良好。

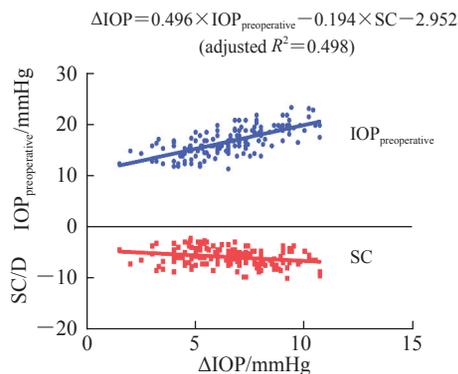


图1 简化回归方程的多元线性回归分析

Fig 1 Multiple linear regression analyses of simplified regression equation

1 mmHg=0.133 kPa. IOP: Intraocular pressure; SC: Algebraic sum of sphero-cylinder; ΔIOP: Change of IOP.

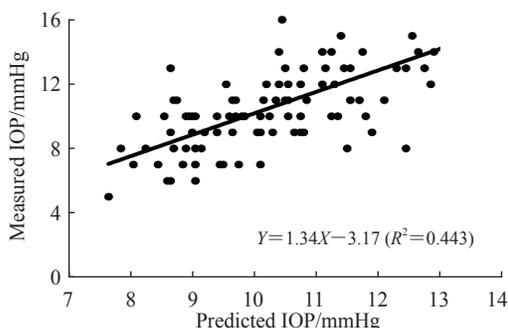


图2 模型预测 SMILE 术后 3 个月 IOP 的外部验证

Fig 2 External validation of the model predicting IOP 3 months after SMILE

1 mmHg=0.133 kPa. SMILE: Small incision lenticule extraction; IOP: Intraocular pressure.

3 讨论

作为激光角膜屈光手术的全新技术, SMILE 与飞秒激光辅助准分子激光原位角膜磨镶术相比, 其优势包括无瓣、医源性干眼减少、对角膜生物力学稳定性的影响减轻等^[6], 生物力学稳定性减轻表现为屈光回退减少和术后角膜扩张风险降低^[1]。然而, 与术前相比, SMILE 术后角膜结构、厚度、生物力学特性仍发生明显改变, 术后临床所测眼压值也发生变化^[7]。Shen 等^[8]研究了 SMILE 透镜扫描与取出对角膜形变及眼压值的影响, 结果显示, 扫描制作透镜对角膜生物力学无显著影响, 而基质内透镜的取出、基质层厚度的减少可能是角膜生物力学发生改变的主要原因。NCT 利用可控的空气脉冲将角膜中央区恒定面积压平 (3.6 mm²), 借助微电脑换算出眼压值。因此, SMILE 术后 NCT

测得的眼压值偏低是由于角膜形态改变或个体重塑差异^[9]等因素所致。同时, 术后糖皮质激素的使用也会对术后眼压的管理、青光眼的诊断和评估造成影响。虽有学者提出可将术后早期眼压作为基线对照, 但早期眼压尚不稳定, 且此法难以动态管理眼压, 这使得术后眼压的预测及校正尤为重要, 而模型的临床应用需要在其准确性和简便性之间取得平衡。

本研究首先分析了 SMILE 术后眼压的变化趋势及稳定期, 结果表明术后 1 个月眼压仍有较大波动, 术后 3 个月则趋于稳定。我院 SMILE 术后糖皮质激素常规使用 1~2 个月, 且 1 个月时的角膜创伤愈合反应尚未结束, 均会对眼压测量结果造成影响, 故术后 1 个月眼压有较大波动。角膜创伤后所有临床参数完全恢复需要 400 余天, 但术后 1 个月达到峰值 (尤其基质的动态重构), 3~6 个月趋于恢复^[10-11]。术后 3 个月时糖皮质激素及角膜的创伤愈合反应对眼压的影响渐小, 故眼压趋于稳定。也有学者认为术后眼压随时间推移无显著变化^[12], 考虑与术后糖皮质激素使用、随访周期或统计误差有关。本研究中术后短期内眼压呈波动趋势且 SC 高度组波动明显, 考虑与角膜愈合、炎症、机体的应激及糖皮质激素使用等有关^[13-14]。

大样本研究提示, 影响角膜屈光手术后眼压变化的因素包括角膜厚度、曲率、硬度及手术方式、年龄、性别、人种等^[15-17]。结合样本量、单因素分析及临床经验, 本研究纳入术前眼压、术前 SC、术前球镜度、术前 CCT、ΔCCT、ΔKm、ΔK2、ΔACD 及年龄 9 个因素拟合出最佳回归方程; 其调整 R² 达 0.533, VIF 均 < 2, 表明此回归方程拟合度良好, 自变量可以反映 ΔIOP 50% 以上的影响因素, 且自变量相对独立。年龄的纳入说明眼压变化尚要关注个体差异。有研究强调了角膜生物力学改变 (如角膜滞后量、角膜阻力因子) 对术后眼压变化的作用^[5,16], 同时也支持了术前眼压、角膜曲率对术后眼压变化的影响。李婧等^[18]研究认为, 角膜中央周边厚度差异较大会对角膜生物力学特性产生影响, 使其抵抗压力的能力下降。

结合临床实际, 决定 ΔCCT 的重要依据正是 SC, 且本研究结果显示术前眼压和 SC 对 ΔIOP 影响的权重最大, ΔCCT 与 SC 呈负相关 (r = -0.587), 同时 SC 值的获取在临床上非常便捷,

因此本研究重点关注并分析 SC 对 SMILE 术后眼压变化的作用。依据 SC 程度对眼压变化趋势进行分组分析, 术后 1 周 SC 高度组眼压发生大幅下降, 随后 SC 低、中、高度 3 组均逐渐趋于稳定。SC 高度组术后眼压波动更明显, 术前与中度组接近, 术后呈断崖式下降, 术后 1 周甚至略低于低度组, 术后 1 个月及之后随访时均介于低、中度组之间。SC 程度越高, 其相应 Δ CCT 越大, 对 NCT 眼压测量的影响就越明显; 另外, 高度近视患者的糖皮质激素高反应、眼球抗压力的下降、眼轴长度、巩膜厚度及遗传等因素对眼压波动的影响也较明显^[19], 上述因素也是青光眼的高危因素^[20]。通过对最佳回归模型自变量的分析筛选, 本研究仅纳入术前眼压和 SC, 推演得出预测和校正的简化公式, 并对其预测效能进行了内部和外部验证, 结果均显示模型的预测性能良好。因此, 简化公式可作为临床参考, 为及时且准确地预测和校正眼压提供思路, 有助于临床便捷且有效地动态管理真实眼压。

关于 SMILE 术后眼压变化影响因素的研究很多, 给出的回归方程也很多, 但自变量信息需调取患者的详细数据, 且系数繁杂^[4-5], 多数在临床上实用性尚不够强。本研究建议可首先采用预测性仍良好的简化公式快速预判, 若异常可进一步采取最佳回归模型, 甚至进行更全面的诊断监测及治疗。动态轮廓眼压计和角膜生物力学分析仪 (Corvis ST) 对屈光术后眼压的测量相对更准确^[21], 其不受角膜厚度、弧度及屈光度影响, 但此类仪器在临床机构的使用非常有限, 且其评估角膜屈光手术后眼压测量值仍有下降。

本研究分析了不同 SC 程度术后眼压的变化趋势, 探讨了眼压波动的可能因素; 拟合最佳回归模型时也关注个体因素, 使最佳拟合模型的代表性明显提高; 同时着重关注简捷、方便及临床实用性, 再次拟合出简化公式, 经验证其预测效能均良好。但本研究也存在局限性, 如未纳入角膜生物力学参数、个体因素考虑尚不全面及仅采用单一 NCT 测量等, 后续研究仍需更严格的试验设计及谨慎分析。

综上所述, SMILE 术后眼压呈下降趋势, 术后 3 个月趋于稳定; 术后短期内眼压波动明显, 且 Δ IOP 与屈光度相关。术后眼压可通过简化公式快速预测和校正, 在预测角膜对手术或治疗的反应及眼压管理方面的应用值得期待, 同时更期待眼压测

量设备的革新。

[参 考 文 献]

- [1] RANDLEMAN J B. Small incision lenticule extraction (SMILE): what now? what next?[J]. *Ophthalmology*, 2020, 127: 1035-1036.
- [2] 张明悦, 张丰菊, 宋彦铮, 赵琦, 张阳, 杨文利, 等. SMILE 手术前后角膜形态学和生物力学特性变化的研究[J]. *中华眼科杂志*, 2020, 56: 103-109.
- [3] 中华医学会眼科学分会角膜病学组. 激光角膜屈光手术临床诊疗专家共识(2015年)[J]. *中华眼科杂志*, 2015, 51: 249-254.
- [4] 李华, 王雁, 窦瑞, 王璐, 危平辉, 赵伟, 等. 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术后眼压测量及其影响因素分析[J]. *中华眼科杂志*, 2016, 52: 22-29.
- [5] FERNÁNDEZ J, RODRÍGUEZ-VALLEJO M, MARTÍNEZ J, TAUSTE A, SALVESTRINI P, PIÑERO D P. New parameters for evaluating corneal biomechanics and intraocular pressure after small-incision lenticule extraction by Scheimpflug-based dynamic tonometry[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2017, 43: 803-811.
- [6] STEINWENDER G, SHAJARI M, MAYER W J, KOOK D, DIRISAMER M, KOHNEN T. [SMILE—small incision lenticule extraction][J/OL]. *Klin Monbl Augenheilkd*, 2020, 237: e15-e34. DOI: 10.1055/a-1291-9041.
- [7] WANG K J, WANG W W, TSAI C L, WANG I J. Intraocular pressure changes in eyes with small incision lenticules and laser *in situ* keratomileusis[J]. *Clin Exp Optom*, 2019, 102: 399-405.
- [8] SHEN Y, ZHAO J, YAO P J, MIAO H M, NIU L L, WANG X Y, et al. Changes in corneal deformation parameters after lenticule creation and extraction during small incision lenticule extraction (SMILE) procedure[J/OL]. *PLoS One*, 2014, 9: e103893. DOI: 10.1371/journal.pone.0103893.
- [9] 刘蕊, 余婷, 潘娇, 邹杨成, 刘李娜, 阙秋霞, 等. 角膜曲率对飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术后患者屈光状态影响的临床研究[J]. *中华眼科杂志*, 2018, 54: 48-54.
- [10] SAMPAIO L P, SHIJU T M, HILGERT G S L, DE OLIVEIRA R C, DEDREU J, MENKO A S, et al. Descemet's membrane injury and regeneration, and posterior corneal fibrosis, in rabbits[J/OL]. *Exp Eye Res*, 2021, 213: 108803. DOI: 10.1016/j.exer.2021.108803.
- [11] RAGHUNATHAN V K, THOMAS S M, STRØM P, YAÑEZ-SOTO B, GARLAND S P, SERMENO J, et al. Tissue and cellular biomechanics during corneal wound injury and repair[J]. *Acta Biomater*, 2017, 58: 291-301.

- [12] 张娜娜,燕振国. 高度近视 SMILE 术后眼压变化及其相关因素分析[J]. 国际眼科杂志, 2017, 17: 1646-1649.
- [13] MARCUS M W, DE VRIES M M, JUNOY MONTOLIO F G, JANSONIUS N M. Myopia as a risk factor for open-angle glaucoma: a systematic review and meta-analysis[J/OL]. *Ophthalmology*, 2011, 118: 1989-1994.e2. DOI: 10.1016/j.ophtha.2011.03.012.
- [14] LUFT N, SCHUMANN R G, DIRISAMER M, KOOK D, SIEDLECKI J, WERTHEIMER C, et al. Wound healing, inflammation, and corneal ultrastructure after SMILE and femtosecond laser-assisted LASIK: a human *ex vivo* study[J]. *J Refract Surg*, 2018, 34: 393-399.
- [15] SCHALLHORN J M, SCHALLHORN S C, OU Y. Factors that influence intraocular pressure changes after myopic and hyperopic LASIK and photorefractive keratectomy: a large population study[J]. *Ophthalmology*, 2015, 122: 471-479.
- [16] LI H, WANG Y, DOU R, WEI P H, ZHANG J M, ZHAO W, et al. Intraocular pressure changes and relationship with corneal biomechanics after SMILE and FS-LASIK[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2016, 57: 4180-4186.
- [17] MAIER A K B, PILGER D, GUNDLACH E, WINTERHALTER S, TORUN N. Long-term results of intraocular pressure elevation and post-DMEK glaucoma after descemet membrane endothelial keratoplasty[J]. *Cornea*, 2021, 40: 26-32.
- [18] 李婧,熊瑛,刘建英,万修华,王宁利. 角膜中央周边厚度差与角膜生物力学的相关性[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志, 2022, 24: 605-609.
- [19] LIN F B, CHEN S D, SONG Y H, LI F, WANG W, ZHAO Z N, et al. Classification of visual field abnormalities in highly myopic eyes without pathologic change[J]. *Ophthalmology*, 2022, 129: 803-812.
- [20] JONAS J B, AUNG T, BOURNE R R, BRON A M, RITCH R, PANDA-JONAS S. Glaucoma[J]. *Lancet*, 2017, 390: 2183-2193.
- [21] CHOW S C, YEUNG B Y M. A review on different tonometers for intraocular pressure measurement after photorefractive keratectomy or small incision lenticule extraction[J]. *Clin Ophthalmol*, 2020, 14: 3305-3323.

[本文编辑] 杨亚红