

多功能人工晶状体计算公式的设计与检验

徐唐 秦爱玲 李一壮

210008 南京大学医学院附属鼓楼医院宁益眼科中心(徐唐、李一壮);210019 南京高等职业技术学校数学教研室(秦爱玲)

通信作者:徐唐,Email:xutangdr@126.com

DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2018.03.012

【摘要】 目的 建立适应眼球数据广泛常规人工晶状体(IOL)计算公式和用于准分子激光角膜原位磨镶术(LASIK)术后眼的 IOL 计算公式。**方法** 采用系列病例研究。依据经典的光学理论,正视状态 IOL 植入眼具备:光线经角膜折射,到达 IOL 平面时的屈光力(F_1)+IOL 屈光力(F_2)=适合玻璃体腔距离的屈光力(F_3)。此后,按 IOL 植入术后的理论、经验和回归分析数据建立数学模型;又按 LASIK 术后眼的角膜曲率修正公式编制常规和 LASIK 术后 2 种 IOL 计算程序,并经南京鼓楼医院白内障摘出联合后房型 IOL 植入术后 644 例患者[600 眼生理角膜眼、7 眼角膜放射状切开(RK)术后眼、37 眼 LASIK 术后眼]资料的检验。**结果** 本研究公式(暂定名:XLQ 公式)包括 RK 术后眼在内的 607 眼 IOL 值平均误差为 0.1 D,95% 一致性界限为 -1.1 ~ +1.2 D。XLQ 公式、SRK-T 公式和 Haigis 公式预测的 IOL 值误差范围分别为 -2.21 ~ +2.25 D、-5.10 ~ +5.63 D 和 -3.00 ~ +3.18 D,IOL 值绝对平均误差分别为 (0.43±0.28)、(0.74±0.53) 和 (0.79±0.49) D,XLQ 公式分别与 SRK-T、Haigis 公式比较,差异均有统计学意义(均 $P=0.000$)。XLQ 公式预测的 IOL 误差值与眼轴长度(AL)、K、A 常数均无相关性(均 $P>0.05$),SRK-T 公式、Haigis 公式预测的 IOL 误差值与 AL、K、A 常数均有相关性(均 $P<0.05$)。XLQ 公式预测的近视 LASIK 术后眼中参与回访者 37 例,IOL 值预测误差范围为 -0.52 ~ +1.18 D,IOL 值绝对平均误差为 (0.49±0.26) D。**结论** XLQ 公式的常规模式适应的 AL、角膜曲率、A 常数的值域宽泛,可用于各种类型的生理角膜眼和 RK 术后眼;专用模式适用于近视 LASIK 术后眼。

【关键词】 白内障;人工晶状体;公式;A 常数;角膜曲率;眼轴长度;角膜放射状切开术;准分子激光原位角膜磨镶术

基金项目: 南京市卫生局医学科技发展基金项目(YKK09106)

Design and inspection of multifunctional intraocular lens calculation formula Xu Tang, Qin Ailing, Li Yizhuang
Department of Ophthalmology, Ningyi Eye Center, Affiliated Drum Tower Hospital of Nanjing University Medical School, Nanjing 210008, China (Xu T, Li YZ); Teaching Section of Mathematics, Nanjing Technical Vocational College, Nanjing 210019, China (Qin AL)

Corresponding author: Xu Tang, Email: xutangdr@126.com

[Abstract] Objective To establish a conventional intraocular lens (IOL) calculation formula which is applicable to eyeballs with abnormal data and laser in situ keratomileusis (LASIK) postoperative eyes. **Methods** A case-series study was adopted. According to the classical optical theory, a normal IOL implanted eye has the following characteristics: when light is refracted by cornea and arrives on the IOL plane, the value of refractive power (F_1) + IOL refractive power (F_2) = the value of refractive power which is suitable for vitreous body depth (F_3). Thereafter, a mathematical model was built on the basis of theory, experience, and regression analysis data after IOL implantation surgeries. Furthermore, based on the new LASIK postoperative cornea curvature modified formula, the two kinds of IOL calculation programs of conventional and LASIK postoperative eyes were established. The test data was collected from 644 patients who had undergone the cataract extractions and IOL implantation surgeries (600 physiological cornea eyes, 7 radial keratotomy [RK] eyes and 37 LASIK postoperative eyes) at the Affiliated Drum Tower Hospital of Nanjing University Medical School. Through the analysis of these data, the new formulas were examined. **Results** With IOL refractive power of 607 eyes (including 7 RK postoperative eyes), the average error of XLQ formula (the tentative name of the established formula in this study) was 0.1 D, and the 95% limits of agreement range was -1.1 to +1.2 D. The error range of IOL refractive power predicted by XLQ, SRK-T and Haigis formulas was -2.21 to +2.25 D, -5.10 to +5.63 D and -3.00 to +3.18 D, respectively, the absolute average error of IOL refractive power predicted by the three formulas was (0.43±0.28), (0.74±0.53) and (0.79±0.49) D,

respectively. Compared with SRK-T and Haigis formulas, the average error of IOL refractive power predicted by XLQ formula was Lower, with significant differences between them (both at $P=0.000$). The error value of IOL refractive power predicted by XLQ formula had no statistical correlations with axial length (AL), keratometry (K) and A constant respectively (all at $P>0.05$), while the error value predicted by SRK-T and Haigis formulas had statistical correlations with AL, K and A constant, respectively (all at $P<0.05$). Thirty-seven patients who had conducted LASIK for myopia (and whose IOL refractive power value were predicted by XLQ formula) had been undergone the postoperative examination. Comparing the predicted and actual value, the error range of IOL refractive power was -0.52 to $+1.18$ D, and the absolute average error was (0.49 ± 0.26) D. **Conclusions** The conventional mode of the XLQ formula established in this study can be used in the cases with broad values of axial length, corneal curvature and A constant, as well as various types of physiological cornea and RK postoperative eyes; the dedicated mode is suitable for LASIK postoperative eyes of myopia.

[Key words] Cataract; Intraocular lens; Formula; A constant; Cornea curvature; Axial length; Radial keratotomy; Laser in situ keratomileusis

Fund program: Medical Science and Technology Development Foundation Supported by Health Bureau of Nanjing (YKK09106)

自白内障摘出联合人工晶状体 (intraocular lens, IOL) 植入术开展以来, 随着手术方法、IOL 设计和制造技术的不断改进, IOL 计算公式也在逐步更新。20 世纪 90 年代的 SRK-T、Haigis、Hoffer Q、Holladay 等第 3 代常规 IOL 公式对正常数值范围眼的 IOL 度数预测较准确, 目前在中国仍普遍使用^[1-4]。但对眼轴长度 (axial length, AL)、角膜曲率 (keratometry, K) 等数值超出正常范围眼或角膜放射状切开 (radial keratotomy, RK) 术后眼, 上述 IOL 公式难以适应^[3,5-8]。近十余年来, 第 4 代常规 IOL 公式 Holladay II 和基于其常规 IOL 公式的准分子激光角膜原位磨镶术 (laser in situ keratomileusis, LASIK) 术后专用公式 Haigis-L 等已获应用^[2]。由于生理角膜和 RK 术后眼光学区域角膜前、后表面基本平行, 计算此两类眼球的 IOL 度数应采用常规 IOL 公式^[5]。LASIK 术后眼的角膜光学区域前表面被切削, 导致其 K 或角膜地形图测量值 (simulatid keratocopy reading, SimK) 高于实际的角膜屈光力^[9], 故需先行修正 K 或 SimK 值, 再用常规 IOL 公式计算。本研究拟结合现有的角膜屈光力修正公式, 设计不受眼球数值范围限制的常规 IOL 公式和适用于 LASIK 术后眼的 IOL 计算公式。

1 资料与方法

1.1 一般资料

采用系列病例研究设计。收集 2010 年 5 月至 2014 年 10 月在南京鼓楼医院眼科行白内障摘出联合后房型 IOL 囊内植入术后 3 个月以上患者 644 例 644 眼 (单眼手术眼或双眼中术后效果较佳眼) 的临床资料。排除标准: IOL 明显偏中心或倾斜者; IOL 错误反植、睫状沟植入者; 手术前后等效 K 值差 >1.0 D 等显

著影响术后眼屈光度者。

607 眼 (生理角膜眼 600 眼, RK 术后眼 7 眼) 中, 男 258 眼, 女 349 眼; 年龄 26 ~ 88 岁, 平均 (67.19 ± 8.40) 岁; AL 为 20.38 ~ 36.95 mm, 平均 (26.02 ± 2.64) mm; K 为 33.06 ~ 50.31 D, 平均 (44.19 ± 1.57) D; 术后眼屈光度为 -11.75 ~ $+3.75$ D, 平均 (-1.52 ± 1.35) D。植入眼内的各类单焦 IOL 共 20 种, A 常数为 117.9 ~ 121.0。

有 LASIK 手术史者 37 例 37 眼, 其中男 12 眼, 女 25 眼; 年龄 30 ~ 66 岁; AL 为 25.45 ~ 33.17 mm; SimK 值为 33.0 ~ 42.03 D。植入熟悉其性能的 4 种 IOL。植入后的眼屈光度为 -3.50 ~ $+0.50$ D。

1.2 方法

1.2.1 术前检查 A 型超声仪 (日本 Tomey 公司) 测量前房深度 (anterior chamber depth, ACD) 和 AL。生理角膜用自动角膜曲率计 (日本 TOPCON 公司) 测量 K 值。RK、LASIK 术后眼用角膜地形图 (日本 Nidek 公司) 测量 SimK 值。IOL Master (德国 Zeiss 公司) 复核。

1.2.2 IOL 度数选择和手术方式 生理角膜患眼用 SRK-T 公式预测 IOL 度数, 术者按各自经验取值。2012 年 8 月自编公式软件完成后, RK、LASIK 术后眼及 $22\text{ mm}<AL<30\text{ mm}$ 伴 $41\text{ D}<K<45\text{ D}$ 的生理角膜眼由自编公式计算。本组患眼由 9 位医师执行小切口手法或超声乳化碎核囊外摘出联合后房型 IOL 植入术。

1.2.3 术后检查 IOL 植入术后 3 个月 (末次) 回访者依次行电脑验光仪 (日本 Topcon 公司) 客观验光、综合验光仪 (日本 Topcon 公司) 主观验光, 自动角膜曲率计测量 K 值, A 型超声测量术后前房深度 (postoperative anterior chamber depth, PACD) 和 AL, 超声生物显微镜 (biomicroscopy, UBM) (日本 Tomey 公司) 检查 IOL 位置、测量 PACD 和 IOL 厚度。因 A 型

超声的声速易受不同类型 IOL 材质等的影响^[10],故采纳 UBM 的 PACD 测量值。

1.2.4 IOL 计算值检验 选用第 3 代公式中较具影响力的 SRK-T、Haigis 公式与自编公式进行比较^[6,8,11]。LASIK 术后眼仅用自编公式验证。将术后眼屈光度、术前 AL、术后 K、A 常数等分别输入 3 种公式,获得各公式的 IOL 验证值。IOL 屈光度误差 = IOL 验证值 - IOL 植入值。

1.2.5 IOL 屈光力理论计算方法 按光学理论,术后正视的 IOL 植入眼具备:平行光线经角膜折射,到达 IOL 平面的屈光力(F_1) + IOL 的屈光力(F_2) = 与玻璃体腔距离(vitreous body depth, VBD)相匹配的屈光力(F_3) (图 1)。

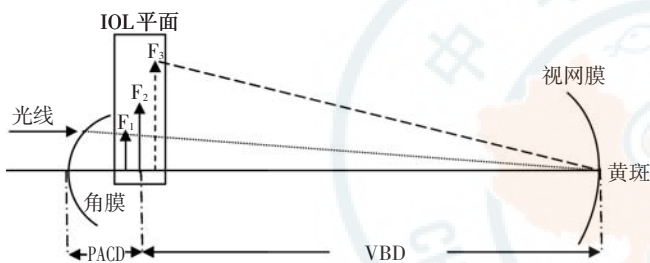


图 1 正视眼 IOL 屈光力理论计算示意图 IOL: 人工晶状体; PACD: 术后前房深度; VBD: 玻璃体腔距离

F_3 计算:将 A 常数/100 定义为 IOL 相对于角膜前表面的折射率(n_3)。根据单透镜屈光力公式 $F = 1000 \times n_3 / f$, $F_3 = 10 \times A / (AL - PACD)$ 。 F_1 计算:根据单球面屈光力公式 $F = 1000 \times (n' - n) / r$,欲使进入眼内的光线聚焦于黄斑区, r 应等于 AL,即 $F = 1000 \times (n' - n) / AL$ 。因此,角膜屈光力的衰减幅度 = $(1000 \times (n' - n) / AL) / AL$; 衰减量 = $PACD \times 1000 \times (n' - n) / AL^2$ 。光线到达 IOL 平面时 $F_1 = K - PACD \times 1000 \times (n' - n) / AL^2$ 。PACD 计算:由各 AL 组、正常 K、平均 A 常数 118.5 的 PACD 和 VBD 回归分析得: $VBD = AL - PACD \approx PACD^2$,即 $PACD \approx \sqrt{AL + 0.25} - 0.5$ (mm)。

综合上述: $F_2 = F_3 - F_1 = 10 \times A / (AL - PACD) - (K - PACD \times 1000 \times (n' - n) / AL^2)$ 。

理论计算方法检验:角膜前表面屈光力 = $1.13514 \times K$,其中 1.13514 为角膜前表面的相对折射率^[9]。因此,绝对折射率 1.406 (Gullstrand 模型眼)的晶状体核相对于角膜前表面的折射率为 $1.406 / 1.13514 = 1.238$ 。如取 $AL = (23.5 + 23.0) / 2 = 23.25$ mm^[12]、 $K = 43.0$ D、玻璃体折射率 = 1.336、 $ACD = (2.5 + 3.0) / 2 = 2.75$ mm,则晶状体的屈光力 = 19.13 D,与静态晶状体的 19.11 D^[12] 相符。

1.2.6 新公式(暂定名:XLQ)的构建 用理论、经验、IOL 验证值和回归分析等数据建立数学模型,由结果推导 IOL 值的计算过程:将 $AL = 23$ mm、 $K = 43$ D、A 常数 = 118.5 设为立体坐标系的原点。Y 轴分别按 $AL = 23$ mm 的 IOL 理论计算值;SRK-T 公式 $AL = 22$ mm、26 mm 的计算值各增加 0.5 D; $AL = 32$ mm 无晶状体眼的理论计算值(参照单透镜屈光力公式得:角膜折射率 $\times 1000 / K = AL$,则 $1.376 \times 1000 / 43$ D = 32 mm。此眼植入 0 D 的 IOL 后可能正视);PACD 回归分析结果等作与 AL 相关的 IOL 计算关系式。X 轴分别按 Haigis、Hoffer Q 公式 2 种 $K = 33$ D 的 IOL 计算值折中数据;SRK-T 公式 $K = 48$ D 的计算值增加 0.5 D;平均 1.25 D 的 IOL 度数矫正 1 D 眼屈光度^[13]等,作与 K 数列相关的 IOL 计算关系式。Z 轴按 $AL = 23$ mm 的 A 常数 $\angle 1 = 1.336$; $AL = 37$ mm、A 常数 118.0 ~ 121.0 的 IOL 值差 = 0.5 D 作与 A 常数数列相关的 IOL 计算关系式。前述通过坐标原点,与 AL、K、A 常数 3 种主要变量相关的各类曲线作为各种数据眼 IOL 值计算的参照系。

此后,依照 IOL 值与 PACD 负相关、A 常数与 PACD 正相关的性质,分别按 Haigis 公式 $K33/AL27$ 的正视预测值;SRK-T 公式 $K49/AL21$ 的 IOL 计算值增加 0.5 D、 $K46/AL30$ 、预留 -1.5 D 眼屈光度的 IOL 计算值; $K37.1/AL37.1$ 无晶状体眼的理论计算值;早期收集的 200 例资料等,设置各 AL 组与 K 数列相关的 IOL 计算关系式。后期按 50 例 K/AL 值显著偏离正常范围、IOL 植入术后正视眼的资料,按点、线拟合原则作 IOL 计算参数的修正。预留眼屈光度按框架眼镜与角膜度数的换算关系设置。

XLQ 公式的 IOL 计算值分布呈扭曲的立体网格状。为了解 AL 由短至长的 IOL 平均值,取 A 常数 = 118.5、 $K = 43$ D,分别将 XLQ、SRK-T 公式 $AL = 20$ mm、 $AL = 37$ mm 的 IOL 计算值之差 / $(37 - 20)$,前述 2 种公式的 IOL 平均值均约为 2.5 D,与 SRK 系列公式的基础:IOL 度数 = A 常数 - $2.5AL - 0.9K$ 中 AL 的系数相同。但 AL 由短至长, XLQ 和 SRK-T 公式 $AL = \angle 1$ mm 的 IOL 度数分别呈 $4.5 \rightarrow 1.5$ D 和 $3.5 \rightarrow 1.5$ D 非线性的递减。

1.2.7 分组信息 根据 AL 将受试者分为 $AL < 22$ mm 组、 $22 \text{ mm} \leq AL < 24$ mm 组、 $24 \text{ mm} \leq AL < 26$ mm 组、 $26 \text{ mm} \leq AL < 28$ mm 组、 $28 \text{ mm} \leq AL < 30$ mm 组和 $AL \geq 30$ mm 组。以 $AL \geq 26$ mm 和 $AL < 26$ mm 将受试者分为长 AL 组和短 AL 组,各组再根据 K 值分为 $K < 42.5$ D 组、 $42.5 \text{ D} \leq K < 45.5$ D 组以及 $K \geq 45.5$ D 组。

1.3 统计学方法

采用 MedCalc 统计学软件对 XLQ 公式的 IOL 计算误差作 Bland-Altman 散点图。采用 SPSS 19.0 统计学软件计算 XLQ、对照组 (SRK-T、Haigis) 公式的绝对平均 IOL 值误差 [Mean MA±SD, MA (MA: IOL 屈光度的误差均为正值)]; 平均 IOL 值误差 [Mean ME±SD, ME (ME: IOL 屈光度的误差值含正、负号)]。MA 作 IOL 差异值的配对样本 *t* 检验; ME 作 IOL 差异值与 AL、K、A 常数等变量的相关性检验。P<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 XLQ 公式 IOL 预测准确性评价

XLQ 公式预测的 607 眼 IOL 屈光度平均误差为 0.1 D, 95% 一致性界限为 -1.1 ~ +1.2 D。若按平均 1.25 D 的 IOL 度数折算成 1.00 D 的眼屈光度, XLQ 公式 IOL 植入术后的眼屈光度与目标屈光度值差 ≤ 1 D 者占 (607-23)/607=96.21%, 高于 Gale 等^[14] 占 85% 的标准。另一方面, 随着植入的 IOL 屈光度由低 (高度近视) 到高 (高度远视), 预测偏差的程度和例数呈递增趋势 (图 2)。

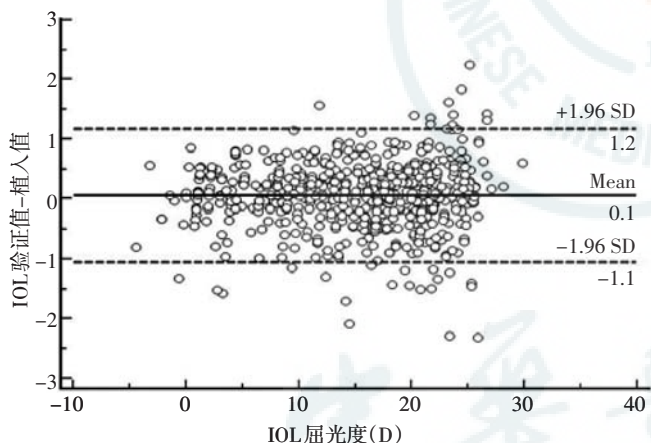


图 2 XLQ 公式 IOL 验证值与 IOL 植入值差异程度的比较 95% 一致性界限为 -1.1 ~ 1.2 D (Bland-Altman 一致性分析, n=607) IOL: 人工晶状体

2.2 不同 AL 组 3 种公式的 IOL 屈光度 MA 比较

XLQ 公式、SRK-T 公式、Haigis 公式计算的所有受试者 IOL 屈光度 MA 分别为 (0.43±0.28)、(0.74±0.53) 和 (0.79±0.49) D。XLQ 公式计算的所有受试者 IOL 屈光度 MA 分别与 SRK-T 和 Haigis 公式比较, 差异均有统计学意义 (*t* = -11.192、-14.957, 均 *P* = 0.000)。其中各 AL 组 XLQ 公式的 IOL 屈光度 MA 均显著低于 SRK-T 公式和 Haigis 公式, 差异均有统计学意义 (均 *P* < 0.025) (表 1)。

表 1 不同 AL 组患者 3 种公式的 IOL 屈光度 MA 比较 ($\bar{x}\pm s, D$)

| 组别 | 眼数 | 不同公式的 IOL 屈光度 MA | | |
|--------------------|-----|------------------|------------------------|------------------------|
| | | XLQ 公式 | SRK-T 公式 | Haigis 公式 |
| AL<22 mm 组 | 50 | 0.57±0.40 | 0.84±0.64 ^a | 1.17±0.74 ^a |
| 22 mm ≤ AL<24 mm 组 | 139 | 0.47±0.33 | 0.64±0.44 ^a | 1.00±0.53 ^a |
| 24 mm ≤ AL<26 mm 组 | 146 | 0.39±0.25 | 0.72±0.51 ^a | 0.77±0.42 ^a |
| 26 mm ≤ AL<28 mm 组 | 106 | 0.45±0.26 | 0.60±0.42 ^a | 0.53±0.34 ^a |
| 28 mm ≤ AL<30 mm 组 | 79 | 0.39±0.25 | 0.69±0.45 ^a | 0.60±0.35 ^a |
| AL ≥ 30 mm 组 | 87 | 0.37±0.25 | 1.11±0.77 ^a | 0.78±0.52 ^a |

注: 与组内 XLQ 公式比较, ^a*P* < 0.05 (配对样本 *t* 检验) AL: 眼轴长度; IOL: 人工晶状体; MA: 绝对平均误差

2.3 不同 AL 组 3 种公式的 IOL 屈光度 ME 比较

607 眼 XLQ 公式的 IOL 屈光度 ME 为 (0.06±0.42) D, AL 与 IOL 屈光度 ME 无显著相关性 (*r* = -0.010, *P* = 0.803)。SRK-T 公式的 IOL 屈光度 ME 为 (-0.11±0.74) D, AL 与 IOL 屈光度 ME 呈负相关 (*r* = -0.236, *P* = 0.000); 其中, AL<22 mm 组和 AL ≥ 30 mm 组 IOL 屈光度 ME < -0.25 D, IOL 平均值低估; 24 mm ≤ AL<26 mm 组的 IOL 屈光度 ME > 0.25 D, IOL 平均值高估。Haigis 公式的 IOL 屈光度 ME 为 (0.28±0.76) D, AL 与 IOL 屈光度 ME 呈负相关 (*r* = -0.601, *P* = 0.000); 其中, AL<26 mm 区间的 IOL 屈光度 ME 均 > 0.25 D, 即 IOL 平均值高估; AL ≥ 28 mm 区间的 IOL 屈光度 ME 均 < -0.25 D, 即 IOL 平均值低估 (表 2)。

表 2 不同 AL 组 3 种公式的 IOL 屈光度 ME 比较 ($\bar{x}\pm s, D$)

| 组别 | 眼数 | 3 种公式的 IOL 屈光度 ME | | |
|--------------------|-----|-------------------|------------|------------|
| | | XLQ 公式 | SRK-T 公式 | Haigis 公式 |
| AL<22 mm 组 | 50 | 0.11±0.56 | -0.31±0.83 | 0.95±0.84 |
| 22 mm ≤ AL<24 mm 组 | 139 | 0.06±0.46 | -0.03±0.62 | 0.91±0.61 |
| 24 mm ≤ AL<26 mm 组 | 146 | 0.04±0.39 | 0.34±0.74 | 0.58±0.57 |
| 26 mm ≤ AL<28 mm 组 | 106 | 0.04±0.44 | 0.00±0.60 | 0.00±0.53 |
| 28 mm ≤ AL<30 mm 组 | 79 | 0.09±0.38 | -0.18±0.67 | -0.38±0.49 |
| AL ≥ 30 mm 组 | 87 | 0.05±0.36 | -0.98±0.87 | -0.68±0.60 |

注: AL: 眼轴长度; IOL: 人工晶状体; ME: 平均误差值

2.4 短 AL 受试者不同 K 值组 3 种公式的 IOL 屈光度 ME 比较

XLQ 公式和 Haigis 公式的 K 值与 IOL 屈光度 ME 无显著相关性 (*r* = 0.040、-0.102, *P* = 0.464、0.064)。SRK-T 公式 K 与 IOL 屈光度 ME 呈正相关 (*r* = 0.319, *P* = 0.000); 其中, K 值 < 42.5 D 组的 IOL 屈光度 ME < -0.25 D, 即 IOL 平均值低估; K ≥ 45.5 D 组的 IOL 屈光度 ME > 0.25 D, 即 IOL 平均值高估。Haigis 公式各类 K 值区间的 IOL 屈光度 ME 均 > 0.25 D, IOL 平均值均高估 (表 3)。

表 3 短 AL 受试者不同 K 值组 3 种公式的 IOL 屈光度 ME 比较 ($\bar{x}\pm s, D$)

| 组别 | 眼数 | 3 种公式的 IOL 屈光度 ME | | |
|-----------------|-----|-------------------|------------|-----------|
| | | XLQ 公式 | SRK-T 公式 | Haigis 公式 |
| K<42.5 D 组 | 47 | 0.03±0.43 | -0.42±0.53 | 0.88±0.52 |
| 42.5≤K<45.5 D 组 | 177 | 0.08±0.44 | 0.07±0.59 | 0.82±0.64 |
| K≥45.5 D 组 | 111 | 0.05±0.46 | 0.35±0.93 | 0.65±0.65 |

注:AL:眼轴长度;IOL:人工晶状体;ME:平均误差值

2.5 长 AL 受试者不同 K 值组 3 种公式的 IOL 屈光度 ME 比较

XLQ 公式的 K 值与 IOL 屈光度 ME 无显著相关性 ($r=-0.018, P=0.770$)。SRK-T 公式的 K 值与 IOL 屈光度 ME 呈正相关 ($r=0.219, P=0.000$), 即各种 K 值组的 IOL 屈光度平均值均低估, 且 K 值越小低估的幅度越大。Haigis 公式 K 与 IOL 屈光度呈负相关 ($r=-0.189, P=0.002$), 即不同 K 值组的 IOL 屈光度平均值均低估, 且 K 值越大低估的幅度越大 (表 4)。

表 4 长 AL 受试者不同 K 值组 3 种公式的 IOL 屈光度 ME 比较 ($\bar{x}\pm s, D$)

| 组别 | 眼数 | 3 种公式的 IOL 屈光度 ME | | |
|-----------------|-----|-------------------|------------|------------|
| | | XLQ 公式 | SRK-T 公式 | Haigis 公式 |
| K<42.5 D 组 | 58 | 0.10±0.39 | -0.67±0.70 | -0.13±0.63 |
| 42.5≤K<45.5 D 组 | 162 | 0.03±0.41 | -0.28±0.65 | -0.26±0.53 |
| K≥45.5 D 组 | 52 | 0.07±0.35 | -0.29±1.19 | -0.74±0.58 |

注:AL:眼轴长度;IOL:人工晶状体;ME:平均误差值

2.6 短、长眼轴 3 种公式预设眼屈光度时与角膜曲率对应的 IOL 屈光度变化趋势

取 K 为 38.0 ~ 48.0 D、术前预设的眼屈光度 (refraction, R) 为 +5.0 ~ -5.0 D, 以 K+R=43 D 为基准, 观察在 AL=22 mm 和 AL=30 mm 条件下各公式不同 K 值和预设眼屈光度时所对应的 IOL 计算值变化趋势。

K=43 D 所对应的 IOL 屈光度代表各公式正视预测值, 若以此为中轴, XLQ 和 Haigis 公式中轴两侧的 IOL 计算值大致对称且呈渐降趋势。SRK-T 公式短、长 AL 眼的正视预测值在 3 种公式中最低, 偏大 K 值区间该公式在 AL≥26 mm 时 (表 4) 须借助预设 R 弥补其 IOL 平均值的低估; 在偏小 K 值区间预设 R 时的 IOL 计算值降幅最大, 即各种 AL 的小 K 值区间 IOL 平均值均低估 (图 3, 4)。

2.7 不同类型 IOL 的 A 常数、IOL 屈光度、PACD 之间的相关性

607 眼 IOL 的 A 常数与 PACD 呈正相关 ($r=0.527, P=0.000$); IOL 屈光度与 PACD 呈负相关

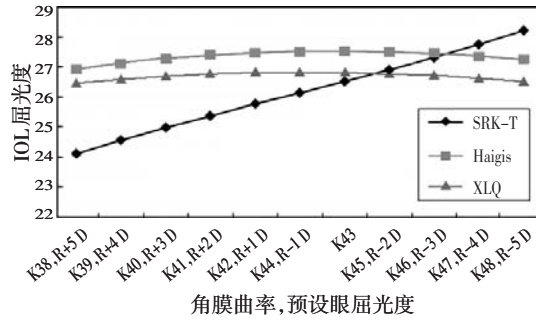


图 3 AL 为 22 mm 时 3 种公式预设眼屈光度与角膜曲率对应的 IOL 值趋势线
IOL:人工晶状体; R:屈光度

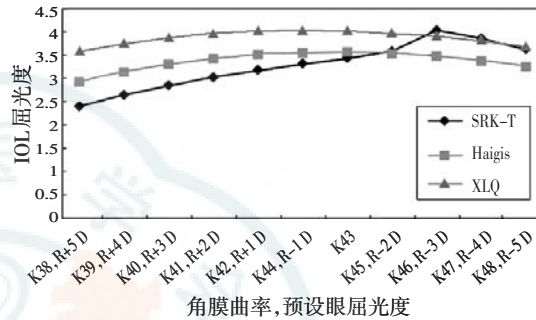


图 4 AL 为 30 mm 时 3 种公式预设眼屈光度与角膜曲率对应的 IOL 值趋势线
IOL:人工晶状体; R:屈光度

($r=-0.732, P=0.000$)。XLQ 公式的 A 常数与 IOL 屈光度无显著相关性 ($r=0.042, P=0.307$)。SRK-T 公式和 Haigis 公式的 A 常数与 IOL 屈光度均呈负相关 ($r=-0.119, P=0.003; r=-0.348, P=0.000$), 即大 A 常数的 IOL 计算值均偏低。

2.8 3 种公式计算不同类型 IOL 屈光度 ME 比较

以 349 眼中相同型号各超过 40 例的 IOL 作 3 种公式的 IOL 类型与 IOL 屈光度 ME 的比较。AMO-ZA9003 型 IOL, A 常数为 119.1 的 PACD 平均值低于其他 A 常数为 118.0 类型的 IOL, 3 种公式的 IOL 屈光度 ME 均偏高, 即 IOL 屈光度平均值均高估。MCX11ASP 型 IOL, A 常数为 118.3 的 PACD 仅小于 A 常数为 121.0 的 BIGBAG 型 IOL。XLQ 公式的 IOL 屈光度 ME 稍低; SRK-T 公式和 Haigis 公式的 IOL 屈光度 ME 均 < -0.25 D, 即 IOL 屈光度平均值均低估 (表 5)。

表 5 不同类型 IOL 组 3 种公式的 IOL 屈光度 ME ($\bar{x}\pm s$)

| IOL 型号 | 眼数 | A 常数 | PACD (mm) | 不同公式的 IOL 屈光度 ME 值 (D) | | |
|---------------|----|-------|-----------|------------------------|------------|------------|
| | | | | XLQ 公式 | SRK-T 公式 | Haigis 公式 |
| ADAPT-AO 型 | 48 | 118.0 | 4.59±0.34 | 0.01±0.37 | 0.09±0.48 | 0.43±0.56 |
| AKROS-A 型 | 62 | 118.0 | 4.40±0.36 | 0.14±0.35 | 0.34±0.57 | 0.68±0.41 |
| MCX11ASP 型 | 56 | 118.3 | 4.89±0.48 | -0.06±0.47 | -0.46±0.82 | -0.28±0.56 |
| SN60WF (IQ) 型 | 42 | 118.7 | 4.40±0.28 | 0.13±0.34 | -0.03±0.48 | 0.74±0.54 |
| AMO-ZA9003 型 | 44 | 119.1 | 4.17±0.35 | 0.40±0.44 | 0.38±0.61 | 1.04±0.67 |
| BIGBAG 型 | 97 | 121.0 | 5.52±0.38 | 0.05±0.32 | -0.43±0.93 | -0.60±0.58 |

注: IOL: 人工晶状体; PACD: 术后前房深度; ME: 平均误差值

2.9 XLQ 公式预测的 LASIK 术后眼 IOL 和眼屈光度误差

XLQ 公式预测的 37 眼近视 LASIK 术后眼 IOL 屈光度误差范围为 $-0.52 \sim +1.18$ D, IOL 屈光度 MA 为 (0.49 ± 0.26) D。其中 28 眼按术后正视预测, IOL 植入术后的眼屈光度为 $-0.5 \sim +0.5$ D, 其余 9 眼预留不同的近视度数, 术后眼屈光度为 $-1.5 \sim -3.5$ D。

3 讨论

3.1 IOL 屈光度误差值检验的临床意义

分析各类 AL 眼的目标与实际眼屈光度差异是评估 IOL 公式计算准确性的通常做法^[3-4,6,11]。本研究比较 IOL 验证值与植入值的差异, 一方面手术前后的 AL、K 值、晶状体赤道部在眼中的位置等数据极少变化, 便于了解预留眼屈光度时 IOL 计算值的依从性; 另一方面可降低 PACD, IOL 的软硬、倾斜程度, 囊袋收缩综合征等术前难以预测因素对 IOL 计算值的影响。其更现实的意义在于可按包含眼度数的 IOL 验证值指导 XLQ 公式的设计。此外, IOL 误差值按 AL、K 值、A 常数等变量归类分析作出的评估更全面, 能发现仅按 AL 分类统计时被掩盖的公式缺陷。

3.2 K 值、眼屈光度与 IOL 的屈光度

IOL 公式的性能主要体现在与 K 值数列 (各类 AL) 相关的 IOL 系列值, 因为眼球、角膜、IOL 3 种屈光度的关系蕴含其间。按术前预设的眼镜平面 R 与角膜平面眼屈光度的换算关系: 角膜平面的眼屈光度 = $R / (1 - 0.012 \times R) = \Delta K$, 则 $R \leq \Delta K$ 。XLQ 和 Haigis 公式 $K = 43$ D 两侧的 IOL 值趋势线大致对称并渐降, 表示其 $R \leq \Delta K$, 是否预设 R, 2 种方式计算出的 IOL 值有统计学意义。SRK-T 公式预设 R 时的 IOL 屈光度趋势线倾斜: 说明 AL 越短、K 值越大、该公式的 IOL 计算值被抬升的幅度越大; 且随 AL 延长, 偏大 K 值区间预留的近视度数与其 IOL 计算值被抬升的幅度之间难寻规律 (对 2 种 IOL 度数区间的 R 值各使用不同的修正值所致); 还表示其 $R > \Delta K$, 是否预设 R 对 IOL 计算值的影响明显。

3.3 眼屈光度、PACD 与 IOL 屈光度

随着眼屈光度由高度远视向高度近视过渡, 若无预设 R, 植入眼内的 IOL 将由高度数的正值镜片向较高度数的负值镜片过渡。为适应临床要求, 使 IOL 后表面紧贴晶状体的后囊膜, 高度数的正值 IOL 为双凸状, PACD 较小; 从较低正度数的 IOL 开始, 随 IOL 度数降低 (负值增大), IOL 前表面由较平坦或浅凹向深凹发展, PACD 逐渐增大。前述眼球、IOL 两者的度数

和 PACD 的变化关系与 IOL 屈光度与 PACD 呈负相关的统计结果相符。本研究的 IOL 屈光力理论推导过程中 F_3 和 F_1 的计算均涉及 PACD, PACD 增大时, F_3 、 F_1 的值差扩大导致 F_2 明显增大, 故高度近视眼的 IOL 度数需予以增加。反之, F_2 明显减小, 需降低给予高度远视眼的 IOL 度数。

3.4 A 常数、PACD 与 IOL 屈光度

资料统计表明, IOL 的 A 常数与 PACD 呈正相关。再结合上述 PACD 与 IOL 计算值“剪刀差”样的变化关系可知: 对同一眼选用较大 A 常数的 IOL 需给予较高的 IOL 度数, 反之, 选用较小 A 常数的 IOL 给予的 IOL 度数应较低。XLQ 公式不同 A 常数的 IOL 值差异程度主要取决于 AL; AL 由短至长, 最小、最大 A 常数的 IOL 值差异呈上大、下小的“V”型 (V 字的左、右侧分别代表最小、最大 A 常数)。故 AL 越短, A 常数与 PACD 的匹配程度越重要。受厂商提供的 IOL 度数范围限制, AMO-ZA9003 型 IOL (双凸镜片) 常用于远视和正常数据范围眼; MCX11ASP 型 IOL (前平后凸或前凹后凸) 常用于各类近视眼。此两种 IOL 的 A 常数与 PACD 的关系恰与上述规律相悖。这是 XLQ 公式随着 IOL 屈光度由低 (高度近视) 到高 (高度远视) 预测偏差的程度和例数递增的原因之一。选择熟悉的 IOL 可提高 IOL 的预测正确率。

对照组公式最小、最大 A 常数的 IOL 计算值差异呈“X”型: AL = 31.5 mm 附近各种 A 常数的 IOL 计算值均为 0 D; IOL 负值区间的 A 常数越大 IOL 计算值越低 (负值越大), 违背同一眼中 A 常数与 IOL 计算值之间存在的规律。本研究资料中就有 SRK-T 公式对 AL ≥ 30 mm 者在 BIGBAG 型或 MCX11ASP 型 IOL 的正视预测值基础上增加 6.0 D, 术后眼屈光度为 $-3 \sim 0$ D 的病例。

3.5 近视角膜屈光手术后眼的 IOL 值计算

常规角膜曲率计按角膜前表面的曲率半径计算角膜总屈光力, 故光学区域两表面大致平行的 RK 术后眼可按生理角膜眼对待; 以 LASIK 为代表的近视屈光手术眼的前表面角膜被切削, 故需对 SimK 或 K 测量值作修正。又因长期眼压的作用, RK、LASIK 术后眼屈光度、角膜曲率均有变化: RK 术后眼的变化关系类似于生理角膜眼; LASIK 术后眼牵涉不同曲率的角膜两表面^[15-20]。

RK 术后眼光学区域的角膜平坦, 使用本常规公式时 IOL 度数可能因 AL、ACD 较术前等幅缩短而轻度高估。另一方面, 矫正近视度数偏大时, 角膜地形图可将旁中央较大的曲率计算在内^[5], IOL 度数可能低

估。前 2 种反向作用部分抵消,所以,XLQ 公式的常规模式适用于 RK 术后眼。

结合 2 种 LASIK 术后的 K 值修正公式^[9]:(1) $F_L = 1.135K_L - 0.135K$ (F_L :LASIK 术后的角膜总屈光力; K_L :LASIK 术后的角膜曲率测量值; K :LASIK 术前的角膜曲率),(2)与“临床病史法”^[21]相同的 $F_L = K - \Delta R$ (ΔR :LASIK 术前、后的眼屈光度增量),得出: $\Delta R = 1.135 \times (K - K_L)$ 。由于“近视回退”后角膜两表面的不同步变化,XLQ 公式的专用模式按 ΔR 、 K 、 K_L 的关系推算其实际的角膜屈光力。

按经典的光学理论、经验及回归分析数据建立新的 IOL 常规公式和 LASIK 术后的专用公式。XLQ 公式的常规模式已用于偏离正常数值眼、RK 术后眼,术后的统计结果显示其性能全面超越对照组公式;XLQ 公式的专用模式已成功应用于近视 LASIK 术后眼。多用途、全适应和较高的预测正确率是新公式的三大特点。

参考文献

- [1] Retzlaff JA, Sanders DR, Kraff MC. Development of the SRK/T intraocular lens implant power calculation formula [J]. J Cataract Refract Surg, 1990, 16(3): 333-340.
- [2] Haigis W. Intraocular lens calculation after refractive surgery for myopia; Haigis-L formula [J]. J Cataract Refract Surg, 2008, 34(10): 1658-1663. DOI:10.1016/j.jcrs.2008.06.029.
- [3] Hoffer KJ. The Hoffer Q formula: a comparison of theoretic and regression formulas [J]. J Cataract Refract Surg, 1993, 19(6): 700-712.
- [4] Holladay JT, Prager TC, Chandler TY, et al. A three-part system for refining intraocular lens power calculations [J]. J Cataract Refract Surg, 1988, 14(1): 17-24.
- [5] 代云海,黄钰森,谢立信.角膜屈光手术后人工晶状体度数的测算 [J]. 中华眼科杂志, 2008, 44(1): 82-85.
- [6] Dai YH, Huang YS, Xie LX. Intraocular lens power calculations following keratorefractive surgery [J]. Chin J Ophthalmol, 2008, 44(1): 82-85.
- [7] MacLaren RE, Natkunarajah M, Riaz Y, et al. Biometry and formula accuracy with intraocular lenses used for cataract surgery in extreme hyperopia [J]. Am J Ophthalmol, 2007, 143(6): 920-931. DOI: 10.1016/j.ajo.2007.02.043.
- [8] Becker KA, Holzer MP, Reuland AJ, et al. Accuracy of lens power calculation and centration of an aspheric intraocular lens [J]. Ophthalmology, 2006, 113(10): 873-876.
- [9] 徐唐,秦爱玲,李一壮,等.角膜屈光力新公式与近视眼准分子激光角膜原位磨镶术后的角膜屈光力 [J]. 南京大学学报:自然科学版, 2011, 47(1): 91-96.
- [10] Xu T, Qin AL, Li YZ, et al. A new formula of corneal refractive power and the corneal refractive powers of myopia eyes after laser in situ keratomileusis [J]. J Nanjing Univ (Nat Sci), 2011, 47(1): 91-96.
- [11] 徐唐,李一壮,张司. A 超与超声活体显微镜对白内障患者房深度测量的比较 [J]. 中华眼科杂志, 2013, 49(2): 130-133. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2013.02.008.
- [12] Xu T, Li YZ, Zhang S. A comparison study of anterior chamber depth using A sonography and biomicroscopy in patient with cataract [J]. Chin J Ophthalmol, 2013, 49(2): 130-133. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2013.02.008.
- [13] 黄芳,赵云娥,黄和和. Haigis 公式预测白内障术后屈光度的准确性 [J]. 眼科研究, 2008, 26(3): 225-227.
- [14] Huang F, Zhao YE, Huang HH. Reliability of Haigis formula in calculation of intraocular lens power [J]. Chin Ophthalmic Res, 2008, 26(3): 225-227.
- [15] 徐亮,吴晓. 同仁眼科手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 536-546.
- [16] 李绍珍,刘奕志. 人工晶体的选择及屈光度的计算 [M]//李凤鸣. 眼科全书. 北京: 人民卫生出版社, 1996: 1673.
- [17] Gale RP, Saldana M, Johnston RL, et al. Benchmark standards for refractive outcomes after NHS cataract surgery [J]. Eye (Lond), 2009, 23(1): 149-152. DOI: 10.1038/sj.eye.6702954.
- [18] Argento C, Cosentino MJ, Tytun A, et al. Corneal ectasia after laser in situ keratomileusis [J]. J Cataract Refract Surg, 2001, 27(9): 1440-1448.
- [19] Ciolino JB, Belin MW. Changes in the posterior corneal in situ keratomileusis and photorefractive keratectomy [J]. J Cataract Refract Surg, 2006, 32(9): 1426-1431.
- [20] Rosa N, Cennamo G, Rinaldi M. Correlation between refractive and corneal topographic changes after photorefractive keratectomy for myopia [J]. J Refract Surg, 2001, 17(2): 129-133.
- [21] Peter RP, Hazeghi M, Job O, et al. Manual keratometry and videokeratography after photorefractive keratectomy [J]. J Cataract Refract Surg, 2000, 26(12): 1748-1752.
- [22] 徐康,褚仁远,李秋华. 角膜放射状切开后 5~8 年屈光稳定性观察 [J]. 眼视光学杂志, 2001, 3(2): 76-77.
- [23] Xu K, Chu RY, Li QH. Stability of refraction 5 to 8 years after radial keratotomy [J]. Chin J Optom Ophthalmol, 2001, 3(2): 76-77.
- [24] Sawelson H, Marks RG. Ten-year refractive and visual results of radial keratotomy [J]. Ophthalmology, 1995, 102(12): 1892-1901.
- [25] Holladay JT. Consultation in refractive surgery [J]. Refract Corneal Surg, 1989, 5: 203.

(收稿日期:2017-03-30 修回日期:2017-12-23)

(本文编辑:刘艳 张宇)

读者·作者·编者

本刊对来稿中作者署名的著录要求

作者向本刊投稿时署名应符合以下条件:(1)参与课题的选题和实验设计,参与实验资料的收集、分析和论证。(2)参与论文的起草或能够对论文中的方法学或关键部分进行修改。(3)能对审稿专家和编辑提出的修改意见进行核修,能够答辩并承担责任。仅参与筹得资金或收集资料者以及仅对科研小组进行一般管理者均不宜署名为作者。文中如有外籍作者,应附外籍作者亲笔签名在本刊发表的同意函。集体署名的文章应于题名下列出署名单位,于文末列出论文整理者的姓名,并须明确该文的主要责任者。

作者署名的名次应按对论文贡献大小顺序排列于文题下方,每篇论文须列出通信作者 1 名。如无特殊约定,则视第一作者为通信作者。作者(包括通信作者)的署名及其排序应在投稿前由所有研究者共同讨论确定,在编排过程中不宜变更或增减,尤其是通信作者和前三名作者,若确需变动者须提供所有署名作者的签名同意函并出示单位证明。有英文文题的论著和综述应有全部作者姓名的汉语拼音,列于英文文题之下。

(本刊编辑部)