

新型角膜生物力学参数在不同程度近视眼中的特性分析

朱娅萍¹, 董开业², 孙曙光³, 李才锐²

引用:朱娅萍,董开业,孙曙光,等. 新型角膜生物力学参数在不同程度近视眼中的特性分析. 国际眼科杂志 2023; 23(4): 704-708

基金项目:云南省科技厅地方高校联合专项重点项目(No. 202001BA070001-007);大理市科技局项目(No.2020KGB051)

作者单位:(671000)中国云南省大理市,大理大学临床医学院;(671000)中国云南省大理市,大理大学第一附属医院²眼科;³内分泌科

作者简介:朱娅萍,大理大学在读硕士研究生,住院医师,研究方向:近视防控、玻璃体视网膜疾病。

通讯作者:李才锐,毕业于中南大学湘雅医学院,眼科学专业博士,教授,大理大学硕士研究生导师,研究方向:近视防控、玻璃体视网膜疾病. lrbrett@163.com

收稿日期:2022-08-29 修回日期:2023-03-15

摘要

目的:研究不同程度近视眼的新型角膜生物力学参数特性,并分析新型参数角膜材料硬度指数(SS1)的相关性。

方法:横断面研究,选取2021-10/11就诊于大理大学第一附属医院不同程度近视成人患者366例718眼,年龄18~50岁,等效球镜度(SE)-0.50~-16.75D。采用IOL Master测量眼轴长度(AL),可视化角膜生物力学分析仪(Corvis ST)测量新型角膜生物力学参数及中央角膜厚度(CCT)和眼压(IOP)。按照SE将受检者分为低度近视、中度近视、高度近视组。数据采用方差分析及Pearson相关进行分析。

结果:各组间最薄点角膜厚度与水平方向厚度变化率比值(ARTh)、SS1均有差异($P<0.001$),其余角膜生物力学参数均无差异($P>0.05$)。SS1与年龄($r=0.102, P=0.006$)、SE($r=0.361, P<0.001$)、IOP($r=0.175, P<0.001$)、CCT($r=0.098, P=0.009$)、SPA1($r=0.182, P<0.001$)呈正相关,与AL($r=-0.331, P<0.001$)、IR($r=-0.545, P<0.001$)呈负相关,与其他角膜生物力学参数均无相关性($P>0.05$)。

结论:随着近视度数的增高及眼轴的增长,SS1值变小,角膜硬度降低,SS1可能是未来近视研究有用的角膜生物力学指标。

关键词:可视化角膜生物力学分析仪;不同程度近视;新型角膜生物力学参数;角膜材料硬度指数

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2023.4.34

Characteristics of new corneal biomechanical parameters in different degrees of myopia

Ya-Ping Zhu¹, Kai-Ye Dong², Shu-Guang Sun³, Cai-Rui Li²

Foundation items: Joint Special Key Project of Local Colleges and Universities of Yunnan Provincial Department of Science and

Technology (No.202001BA070001-007); Project of Dali Science and Technology Bureau (No.2020KGB051)

¹School of Clinical Medicine, Dali University, Dali 671000, Yunnan Province, China; ²Department of Ophthalmology, First Affiliated Hospital of Dali University, Dali 671000, Yunnan Province, China; ³Department of Endocrinology, First Affiliated Hospital of Dali University, Dali 671000, Yunnan Province, China

Correspondence to: Cai-Rui Li. Department of Ophthalmology, First Affiliated Hospital of Dali University, Dali 671000, Yunnan Province, China. lrbrett@163.com

Received:2022-08-29 Accepted:2023-03-15

Abstract

• AIM: To study the characteristics of new corneal biomechanical parameters in different degrees of myopia and analyze the correlation of the new parameter stress-strain index (SSI).

• METHODS: A cross-sectional study was conducted on 366 adult patients (718 eyes) with different degrees of myopia who received treatment at the First Affiliated Hospital of Dali University from October 2021 to November 2021, aged 18-50 years, and the spherical equivalent (SE) was -0.50~-16.75D. The axial length (AL) of the eye was measured by IOL master, and the new corneal biomechanical parameters, central corneal thickness (CCT) and intraocular pressure (IOP) were measured by corneal visualization Scheimpflug technology (Corvis ST). The subjects were categorized into low myopia, moderate myopia and high myopia groups according to SE. The data were analyzed by ANOVA and Pearson correlation.

• RESULTS: The ratio of the thinnest corneal thickness to horizontal thickness change rate (ARTh) and SSI were statistically significant ($P<0.001$), while the remaining parameters were not statistically significant ($P>0.05$). SSI was positively correlated with age ($r=0.102, P=0.006$), SE ($r=0.361, P<0.001$), IOP ($r=0.175, P<0.001$), CCT ($r=0.098, P=0.009$), SPA1 ($r=0.182, P<0.001$), negatively correlated with AL ($r=-0.331, P<0.001$), IR ($r=-0.545, P<0.001$) and had no correlation with other corneal biomechanical parameters ($P>0.05$).

• CONCLUSION: With the increase of myopia degree and the elongation of the axial length, the SSI value becomes smaller and the corneal hardness decreases. SSI may be a helpful corneal biomechanical indicator for future research on myopia.

• KEYWORDS: corneal visualization Scheimpflug technology; different degrees of myopia; new corneal biomechanical parameters; stress-strain index

Citation: Zhu YP, Dong KY, Sun SG, et al. Characteristics of new corneal biomechanical parameters in different degrees of myopia. *Guoji Yanke Zazhi(Int Eye Sci)* 2023;23(4):704-708

0 引言

有相关研究预估,截止 2050 年,全球将分别有接近 50 亿和 10 亿人受到近视和高度近视的影响,其中大多数近视患者年龄在 20~40 岁^[1],且逐渐呈现低龄化趋势^[2]。近视作为眼部最常见的眼病不容小觑,在全球范围内患病率不断上升^[3],最终可导致病理性近视,出现一系列严重的并发症,增加了视网膜脱离、后巩膜葡萄肿、青光眼、白内障、黄斑裂孔等的风险^[4-6],导致不可逆的视力丧失,成为视野缺损、视力损害和失明的主要原因之一。随着可视化角膜生物力学分析仪(corneal visualization Scheimpflug technology, Corvis ST)的研究进展,新型 Corvis ST^[7]通过综合多项角膜测量参数形成新的参数,这些参数通常具有较好的一致性与重复性^[8-10],能更具体详细地呈现出角膜的生物力学特征,具有较大的研究潜力。评估近视患者角膜生物力学特性,可能是了解近视进展的一种方法,高度近视患者发生近视并发症的风险增加,值得更多关注,这对预防高度近视发展具有重要意义。因此,通过对不同程度近视眼进行角膜生物力学的测量,观察近视人群中新型角膜生物力学参数变化,对评估近视进展和角膜屈光手术具有较好的临床应用前景。

1 对象和方法

1.1 对象

横断面研究。选取 2021-10/11 就诊于大理大学第一附属医院不同程度近视成人患者 366 例 718 眼。按照等效球镜度(SE)将受检者分为低度近视组($-0.50D \leq SE < -3.00D$)、中度近视组($-3.00D \leq SE < -6.00D$)、高度近视组($SE \geq -6.00D$)。纳入标准:(1)年龄 18~50 岁;(2)检查前受检者无角膜接触镜配戴史;(3)散光 $\leq 1.5D$;(4)10mmHg \leq 眼压(IOP) ≤ 21 mmHg,480 $\mu m \leq$ 中央角膜厚度(CCT) $\leq 650\mu m$ 。排除标准:(1)屈光不正以外的其他眼部疾病及全身系统性疾病;(2)有眼部外伤史或手术史,包括屈光手术;(3)2mo 内有全身药物使用史或眼部局部药物使用史;(4)有眼部遗传病家族史,如青光眼;(5)检查不配合者,包括精神疾病或无法提供知情同意。受检者均在听取充分解释后签署知情同意书,且本研究通过医院伦理委员会批准。

1.2 方法

1.2.1 一般检查

进行病史询问,所有受试者均接受了全面的眼科检查,包括裂隙灯显微镜检查、自动验光仪检查等。使用电脑验光仪(AR-1)测量 SE(SE=球镜度+1/2 柱镜度)。用光学生物测量仪(IOL Master 500)测量眼轴(AL)。

1.2.2 新型角膜生物力学参数检查

Corvis ST 使用超高速 Scheimpflug 摄像头来采集横截面图像,从而监测角膜的变形过程,这一特征使我们能够看到角膜的动态变化。用 Corvis ST 测量新型角膜生物力学参数,在测量时,将患者下颌置于下颌托上,额头向前与额托相贴,双眼睁开并注视前方,调节操控杆,当显示屏幕上的圆圈中间显示“+”符号,聚焦完成,仪器自动检测并获得测量结果。在喷气过程避免眨眼或闭眼,检查系统自带质量监控确保数据的准确性,取质量监控为“OK”的数据结果进行统计。如上所述,在一次测量过程中该仪器自动分析了一系列角膜生物力学参数,主要测量新型参数见表 1。

以上所有检查均由经验丰富的眼科医生在 9:00 至 18:00 之间进行,每一患者的检查时间尽量固定,均在瞳

孔自然状态下完成,均进行了 3 次质量良好的测量,并使用平均值进行统计分析。

统计学分析:采用统计学软件 SPSS26.0 进行数据分析,对连续性变量使用 Kolmogorov-Smirnov 检验其正态性,计量资料用均数 \pm 标准差表示,根据数据特征选用单因素方差分析,组间进一步两两比较采用 LSD-*t* 检验。计数资料的组间比较采用卡方检验。采用 Pearson 相关分析法分析两变量间的相关性,并进行线性回归分析。以 $P < 0.05$ 认为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 基本情况

本次研究共收集 366 例 718 眼,其中男 155 例(42.3%),女 211 例(57.7%),年龄 18~50(平均 23.19 \pm 4.99)岁,SE 为 $-0.50 \sim -16.75$ (平均 -4.48 ± 2.50)D。其中低度近视组 200 眼,中度近视组 316 眼,高度近视组 202 眼。经统计学分析,三组间的年龄、SE、AL 比较,差异均有统计学意义($P < 0.001$),而性别、CCT、IOP 差异均无统计学意义($P > 0.05$),见表 2。

2.2 各组间新型角膜生物力学参数特性

各组间 ARTh、SSI 差异均有统计学意义($P < 0.001$),其余参数均无统计学意义($P > 0.05$)。其中 ARTh、SSI 进一步进行两两比较发现,低度近视组与高度近视组比较差异均有统计学意义($P < 0.001$),中度近视组与高度近视组比较差异均有统计学意义($P < 0.05$);低度近视组与中度近视组 ARTh 差异比较无统计学意义($P > 0.05$),见表 3,图 1。

2.3 新型参数 SSI 与年龄、SE、AL 及其他新型参数相关性分析

SSI 与年龄($r = 0.102, P = 0.006$)、SE($r = 0.361, P < 0.001$)、IOP($r = 0.175, P < 0.001$)、CCT($r = 0.098, P = 0.009$)、SPA1($r = 0.182, P < 0.001$)呈正相关,与 AL($r = -0.331, P < 0.001$)、IR($r = -0.545, P < 0.001$)呈负相关,与 ARTh、TBI、CBI 无相关性($r = -0.012, -0.016, -0.043, P = 0.742, 0.664, 0.253$),见图 2。

3 讨论

增加对近视角膜生物力学特性及其变形反应的了解非常重要。从 Corvis ST 获得的数据可能会扩大我们对健康角膜生物力学的理解,并可能有助于相关眼疾病筛查和诊疗。Corvis ST 使用超高速 Scheimpflug 摄像头采集横截面图像,从而监测角膜的变形过程,并记录多项角膜生物力学参数,且已被证明具有可接受的重复性^[12-13]。但是由于该仪器在近视方面尚未被广泛使用,相关临床数据受到一定限制。本研究基于以往的研究考虑到 IOP 与 CCT 对角膜生物力学影响较大,纳入的研究对象眼压均在正常范围内且排除偏薄($< 480\mu m$)及较厚($> 650\mu m$)的角膜,因此在本研究中,各组之间 CCT 和 IOP 不具有统计学意义,同时显示各组间的 SE、AL 及年龄具有差异性,与之前的研究一致^[14-15],但年龄差异较小,考虑可能与样本量选择有关。

在比较各组间角膜生物力学时发现高度近视与低中度近视患者的 ARTh 存在显著差异性,即高度近视患者 ARTh 值变大。该值变大表明中央角膜变厚或角膜厚度幅度变化较小,但在我们的研究中各组间的 CCT 无明显差异性($P = 0.223$),所以研究结果表明高度近视患者由中央到周边的角膜厚度变化不明显,或许可以解释为高度近视很少并发圆锥角膜,且我们测量的角膜厚度不能完全反映角膜生物反应的变化,需要进一步证实。另外研究发现

表1 Corvis ST 测量新型角膜生物力学参数

新型参数	解释
ARTh	最薄点角膜厚度与水平方向厚度变化率比值,值越小代表中央角膜厚度越薄或角膜厚度由内向外变化越大
综合半径(IR)	角膜形变过程中顶点处曲率半径倒数的综合值
角膜硬度参数(SPA1)	角膜第一次压平时其受力与形变位移的比值
SSI	角膜材料硬度指数
CBI	角膜生物力学指数,基于不同动态角膜响应参数、硬度参数和水平切面角膜厚度分布的 Logistic 回归公式得出
TBI	该指数用于综合评估圆锥角膜风险

注:CBI 计算表达式为: $CBI = \text{EXP}(\text{Beta}) / [1 + \text{EXP}(\text{Beta})]$ 。其中, $\text{Beta} = B1 \times A1V + B2 \times \text{ARTh} + B3 \times \text{SPA1} + B4 \times \text{DAR}(1\text{mm}) + B5 \times \text{DAR}(2\text{mm}) + B6 \times \text{SD} - \text{DA} + B7$, $B1 = -59.487$, $B2 = -0.027$, $B3 = -0.092$, $B4 = -27.169$, $B5 = 5.472$, $B6 = -0.599$, $B7 = 46.576$,SD-DA 为角膜最大凹陷形变幅度的标准差^[11]。新型的 Corvis ST 和 Pentacam 联合后综合分析角膜形态学和生物力学指标,生成新型圆锥角膜综合风险指数(TBI),在圆锥角膜的诊断中有重要指导意义。

表2 各组基本资料及眼部其他参数分析

组别	性别(男/女,眼)	年龄($\bar{x} \pm s$,岁)	SE($\bar{x} \pm s$,D)	AL($\bar{x} \pm s$,mm)	CCT($\bar{x} \pm s$, μm)	IOP($\bar{x} \pm s$,mmHg)
低度近视组	87/113	22.41 \pm 4.84 ^a	-1.65 \pm 0.81	23.96 \pm 0.83	543.9 \pm 34.64	16.15 \pm 2.90
中度近视组	136/180	22.72 \pm 4.02 ^a	-4.28 \pm 0.81	25.04 \pm 0.82	539.5 \pm 32.10	16.00 \pm 2.47
高度近视组	82/120	24.59 \pm 5.95	-7.60 \pm 1.67	26.18 \pm 1.08	538.2 \pm 34.86	16.42 \pm 2.69
χ^2/F	0.419	12.514	1428.492	301.495	1.657	1.504
P	0.811	<0.001	<0.001	<0.001	0.223	0.191

注:低度近视组:-0.50D \leq SE<-3.00D;中度近视组:-3.00D \leq SE<-6.00D;高度近视组:SE \geq -6.00D。^a P <0.05 vs 高度近视组。

表3 各组间角膜生物力学分析比较

组别	ARTh	IR	SPA1	TBI	CBI	SSI
低度近视组	574.91 \pm 140.88 ^a	7.78 \pm 0.99	99.63 \pm 17.45	0.43 \pm 0.28	0.12 \pm 0.24	1.08 \pm 0.15 ^{a,c}
中度近视组	597.07 \pm 141.02 ^a	7.93 \pm 0.95	97.81 \pm 16.24	0.40 \pm 0.29	0.09 \pm 0.20	1.03 \pm 0.14 ^a
高度近视组	634.07 \pm 159.64	7.98 \pm 1.01	98.16 \pm 15.93	0.42 \pm 0.30	0.07 \pm 0.19	0.94 \pm 0.16
F	8.437	2.215	0.783	0.626	2.807	46.361
P	<0.001	0.110	0.458	0.535	0.061	<0.001

注:低度近视组:-0.50D \leq SE<-3.00D;中度近视组:-3.00D \leq SE<-6.00D;高度近视组:SE \geq -6.00D。^a P <0.05 vs 高度近视组;^c P <0.05 vs 中度近视组。

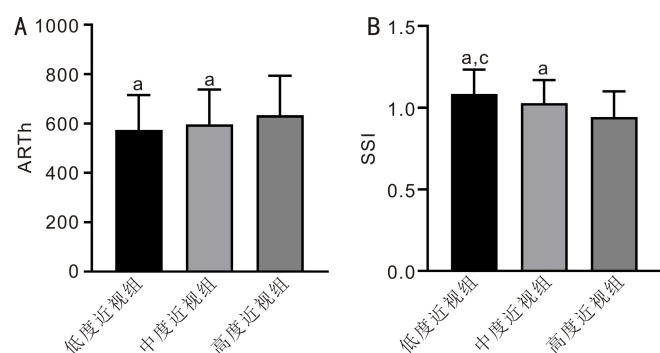


图1 各组间 ARTh 及 SSI 的比较 A:ARTh;B:SSI。^a P <0.05 vs 高度近视组;^c P <0.05 vs 中度近视组。

不同程度近视患者的 IR 和 SPA1 并没有显著差异,这与以往在印度人群中的研究一致^[7]。在之前的一项研究中^[16],给出了中国近视受试者 SPA1 的参考值,其平均值为 90.46 \pm 15.39。在我们的研究中,SPA1 的平均值在其范围内,且该研究同样未发现 SPA1 在各组间具有差异性^[16],考虑可能均在健康角膜中研究而未与其他角膜病变进行对比有关。

CBI 和 TBI 在预测角膜扩张或早期圆锥角膜方面具

有较高的灵敏性和特异性^[17-18]。CBI 和 TBI 值在 0 到 1 之间,值越大表明角膜生物力学越弱。之前有一项关于正常角膜和圆锥角膜的角膜生物力学研究报告称,正常眼睛的 CBI 值范围为 0.00~0.88,平均值 \pm 标准差为 0.06 \pm 0.14,TBI 值的范围为 0.07~0.75,平均值 \pm 标准差为 0.07 \pm 0.10^[17]。在本研究中,CBI 值和 TBI 值均在正常范围内,且各组之间没有显著差异性。基于 CBI 量表,该值为 0.1 被视为正常,0.25 为临界值,而超过 0.25 则被视为异常^[7]。本研究中各组间的 CBI 值的平均值 \pm 标准差分别为 0.12 \pm 0.24、0.09 \pm 0.20、0.07 \pm 0.19,均在正常范围内,均未超过临界值 0.25。

本研究还探索了新的角膜生物力学参数:SSI。Eliasy 等^[19]通过使用受不同眼压水平影响的人类眼球各种几何形状的有限元模型,得出新型参数 SSI 与 CCT 和 IOP 没有显著相关性,仅与年龄显著相关。以 50 岁人群健康角膜的平均组织力学特征为基准(即 SSI 标准值为 1.0),数值变大则角膜变硬,如角膜交联术后;数值变小则角膜变软,如圆锥角膜进展,这是一种评估角膜组织材料力学性能的理想方法。作为一种独立于眼压和角膜其他结构的新指标,SSI 可以帮助检测角膜屈光手术后对角膜异常扩张、

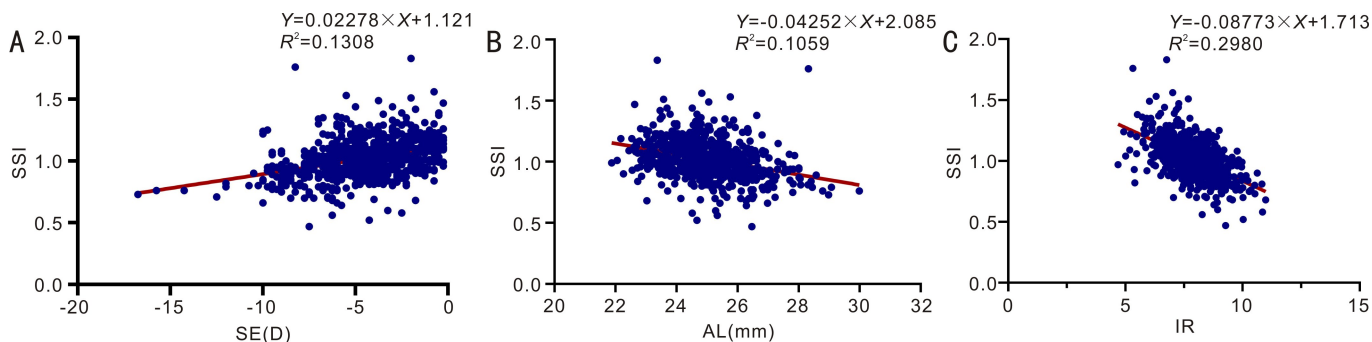


图2 新型参数 SSI 与 SE、AL、IR 的相关性 A:SE;B:AL;C:IR。

具有较高风险或易感性的患者,提醒医生角膜生物力学特性降低可能带来的风险,有助于手术个性化的实施^[20]。

在我们的研究中,我们证明各组间 SSI 具有显著差异性,并且 SSI 与 SE 呈正相关($r=0.361, P<0.001$),与 AL 呈负相关($r=-0.331, P<0.001$),结果表明高度近视眼的 SSI 值低于中低度近视眼,随着近视度数的增加或眼轴的增长,角膜的生物力学特性发生变化,角膜硬度降低。在以往的研究中显示第二次压平时的参数与最大凹陷程度时的参数与近视程度存在显著差异,其中变化最明显的是第二次压平时的速度(A2V)、峰值距离(PD)和形变幅度(DA)3个参数^[14,21-22],表明随着近视度数的增加,角膜硬度降低,这与我们应用新型参数得出的结论一致,也证实了数据的可靠性。据我们所知,SSI 与近视程度的相关研究报道还很少,2020年 Han 等^[23]首次报道 SSI 与 SE 呈正相关,与我们的结论一致,但此研究仅纳入低、高度近视患者,并且未对近视患者测量 AL,无法明确 AL 与 SSI 之间的关系。Liu 等^[24]将近视眼分为 $AL<26\text{mm}$ 和 $AL\geq 26\text{mm}$ 两组进行研究,但 SE 和 SSI 之间的关系尚不明确。因此,我们的研究同时纳入 SE 及 AL 两个影响因素,分析低、中、高度近视患者角膜生物力学参数 SSI 的差异性。2022 年最新的研究报告表明 SSI 随着近视和散光加深显著下降,猜测 SSI 降低可能与高度近视和超高度近视发病机制有关,但具体机制有待进一步研究^[25]。有研究发现在儿童、青少年时期近视角膜比正视或远视角膜更柔软,变形性更强,或许可以解释近视进展的部分原因^[26-27]。因此在以后的研究中,或许可以通过对 SSI 的比较来分析不同程度近视的角膜生物力学特性,并且为研究近视的发病机制提供了一条新的途径。

此外,我们还分析了 SSI 与年龄、IOP、CCT 及其他新型参数等的相关性。与 Han 等^[23]的研究一致,我们观察到 IOP($r=0.175, P<0.001$)、CCT($r=0.098, P=0.009$)与 SSI 存在弱相关性。这表明,SSI 的引入虽然进行了矫正,解决了受 IOP 和 CCT 的影响,但它只是估计材料的刚度,角膜生物力学的测量仍然不能完全独立于眼压和角膜厚度,这与我们的临床经验和以往的研究是一致的。本研究发现年龄($r=0.102, P=0.006$)与 SSI 存在相关性,且 SSI 与年龄之间的关系已被报道^[19,28]。Liu 等^[28]研究发现年龄与 SSI 存在非线性关系,在 35 岁之前 SSI 相对稳定,35 岁之后 SSI 随着年龄的增长显著增加。因为本研究所选个体年龄多集中于 23 岁左右,没有太大的年龄梯度,且未纳入低龄与高龄人群,所以导致 SSI 与年龄的相关性不显著。目前很少有研究报道年轻人角膜与年龄之间的关

系,这种关系是否是 SSI 与年轻人之间没有显著相关性的原因仍有待探讨。另外在我们的研究中,SSI 与 IR 呈负相关($r=-0.545, P<0.001$),与 SPA1 呈正相关($r=0.182, P<0.001$),IR 数值越小表明角膜抵抗变形能力越好,而 SPA1 数值越大表明硬度越高。因此,SSI 与这两个角膜参数指标具有较好的一致性,即 SSI 值越大,角膜抗变形能力越好^[29]。

本研究主要局限性如下:(1)我们的研究仅根据屈光度来定义近视,默认纳入的是轴性近视患者。(2)这是一项横断面研究,样本量相对较小,所以只能确定角膜生物力学特性和不同程度近视之间的相关性,而不能确定因果关系。(3)我们没有远视和正视眼作为对照组,来评估角膜变形特性。(4)我们的研究对象的年龄范围有限。这些将在未来的研究中得到改进和补充。

综上所述,通过对不同程度近视眼的新型角膜生物力学参数特性分析发现,随着近视度数的增高及眼轴的增长,SSI 值变小,角膜硬度降低,SSI 可能是未来近视研究有用的角膜生物力学指标。

参考文献

- Holden BA, Fricke TR, Wilson DA, *et al.* Global prevalence of myopia and high myopia and temporal trends from 2000 through 2050. *Ophthalmology* 2016;123(5):1036-1042
- Dong L, Kang YK, Li Y, *et al.* Prevalence and time trends of myopia in children and adolescents in China: a systemic review and meta-analysis. *Retina* 2020;40(3):399-411
- 慕璟玉,王雁,浏梦,等.近视的病因研究新进展. *国际眼科杂志* 2021;21(10):1746-1750
- Tseng GL, Chen CY. Evaluation of high myopia complications prevention program in university freshmen. *Medicine* 2016; 95(40):e5093
- Wu PC, Huang HM, Yu HJ, *et al.* Epidemiology of myopia. *Asia Pac J Ophthalmol (Phila)* 2016;5(6):386-393
- Haarman AEG, Enthoven CA, Tideman JW, *et al.* The complications of myopia: a review and meta-analysis. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2020; 61(4):49
- Kenia VP, Kenia RV, Pirdankar OH. Association between corneal biomechanical parameters and myopic refractive errors in young Indian individuals. *Taiwan J Ophthalmol* 2020;10(1):45-53
- Yang KL, Xu LY, Fan Q, *et al.* Repeatability and comparison of new Corvis ST parameters in normal and keratoconus eyes. *Sci Rep* 2019;9(1):15379
- 任胜卫,杨凯丽,徐丽妍,等. Corvis ST 测量近视患者新型角膜生物力学参数的重复性及其影响因素. *中华实验眼科杂志* 2019;37

- (12):990-994
- 10 Wang XR, McAlinden C, Zhang HB, *et al.* Assessment of corneal biomechanics, tonometry and pachymetry with the corvis ST in myopia. *Sci Rep* 2021;11(1):3041
- 11 Vinciguerra R, Ambrósio R Jr, Elsheikh A, *et al.* Detection of keratoconus with a new biomechanical index. *J Refract Surg* 2016;32(12):803-810
- 12 Lopes BT, Roberts CJ, Elsheikh A, *et al.* Repeatability and reproducibility of intraocular pressure and dynamic corneal response parameters assessed by the corvis ST. *J Ophthalmol* 2017;2017:8515742
- 13 Herber R, Vinciguerra R, Lopes B, *et al.* Repeatability and reproducibility of corneal deformation response parameters of dynamic ultra-high-speed Scheimpflug imaging in keratoconus. *J Cataract Refract Surg* 2020;46(1):86-94
- 14 Sedaghat MR, Momeni-Moghaddam H, Azimi A, *et al.* Corneal biomechanical properties in varying severities of myopia. *Front Bioeng Biotechnol* 2020;8:595330
- 15 Yu AY, Shao H, Pan AP, *et al.* Corneal biomechanical properties in myopic eyes evaluated via Scheimpflug imaging. *BMC Ophthalmol* 2020;20(1):279
- 16 Zhang YH, Wang Y, Li LY, *et al.* Corneal stiffness and its relationship with other corneal biomechanical and nonbiomechanical parameters in myopic eyes of Chinese patients. *Cornea* 2018;37(7):881-885
- 17 Ambrósio R Jr, Lopes BT, Faria-Correia F, *et al.* Integration of scheimpflug-based corneal tomography and biomechanical assessments for enhancing ectasia detection. *J Refract Surg* 2017;33(7):434-443
- 18 Ren SW, Xu LY, Fan Q, *et al.* Accuracy of new Corvis ST parameters for detecting subclinical and clinical keratoconus eyes in a Chinese population. *Sci Rep* 2021;11(1):4962
- 19 Eliasy A, Chen KJ, Vinciguerra R, *et al.* Determination of corneal biomechanical behavior *in vivo* for healthy eyes using CorVis ST tonometry: stress-strain index. *Front Bioeng Biotechnol* 2019;7:105
- 20 Kenia VP, Kenia RV, Pirdankar OH. Short term changes in corneal stress-strain index and other corneal biomechanical parameters post-laser *in situ* keratomileusis. *Indian J Ophthalmol* 2021;69(10):2650-2656
- 21 Lee R, Chang RT, Wong IYH, *et al.* Assessment of corneal biomechanical parameters in myopes and emmetropes using the Corvis ST. *Clin Exp Optom* 2016;99(2):157-162
- 22 He M, Wang W, Ding H, *et al.* Corneal biomechanical properties in high myopia measured by dynamic scheimpflug imaging technology. *Optom Vis Sci* 2017;94(12):1074-1080
- 23 Han F, Li MD, Wei PH, *et al.* Effect of biomechanical properties on myopia; a study of new corneal biomechanical parameters. *BMC Ophthalmol* 2020;20(1):459
- 24 Liu GH, Rong H, Zhang P, *et al.* The effect of axial length elongation on corneal biomechanical property. *Front Bioeng Biotechnol* 2021;9:777239
- 25 Liu Y, Pang CJ, Ming S, *et al.* Effect of myopia and astigmatism deepening on the corneal biomechanical parameter stress-strain index in individuals of Chinese ethnicity. *Front Bioeng Biotechnol* 2022;10:1018653
- 26 Matalia J, Francis M, Gogri P, *et al.* Correlation of corneal biomechanical stiffness with refractive error and ocular biometry in a pediatric population. *Cornea* 2017;36(10):1221-1226
- 27 龙文, 李周越, 胡音, 等. 角膜生物力学及校正眼压与青少年屈光状态的相关性. *中华眼视光学与视觉科学杂志* 2020;22(9):652-658
- 28 Liu GH, Rong H, Pei RX, *et al.* Age distribution and associated factors of cornea biomechanical parameter stress-strain index in Chinese healthy population. *BMC Ophthalmol* 2020;20(1):436
- 29 刘国英, 荆丽丽, 李杰, 等. 角膜应力-应变指数在圆锥角膜诊断中的价值及 CXL 术后角膜生物力学参数变化的研究. *中华眼科杂志* 2022;8:584-591