

· 临床研究 ·

近视患者角膜生物力学与 Schlemm 管和小梁网形态的相关性研究

杨丹丹¹ 尹禾¹ 彭祎琳¹ 王军明²¹武汉艾格眼科医院, 武汉 430014; ²广州医科大学附属第二医院眼科, 广州 510260

通信作者: 王军明, Email: eyedrwjm@163.com

【摘要】 目的 评估近视患者角膜生物力学参数与 Schlemm 管 (SC) 和小梁网 (TM) 形态的相关性。**方法** 采用横断面研究设计, 连续纳入 2021 年 5—12 月就诊于武汉艾格眼科医院屈光手术科的近视患者 81 例, 根据等效球镜度 (SE) 和眼轴长度 (AL) 分成 2 个组, 其中中低度近视 (SE 为 $-0.5 \sim -6.0$ D, AL < 26 mm) 39 例 39 眼、高度近视患者 (SE ≤ -6.0 D, AL ≥ 26 mm) 42 例 42 眼。纳入同期健康体检人群 20 例 20 眼作为健康对照组, 其中男 10 例 10 眼, 女 10 例 10 眼。均纳入右眼数据进行分析。采用 Corvis ST 测量角膜生物力学参数, 采用 Cirrus HD-OCT 5000 观察 SC 和 TM 形态。比较各组角膜生物力学参数、鼻侧 SC (SC-N) 和颞侧 SC (SC-T) 的面积、鼻侧 TM (TM-N) 和颞侧 TM (TM-T) 的宽度和厚度的差异, 采用 Pearson 线性相关分析对近视患者角膜生物力学参数与 SC、TM 和生物力学校正眼压 (bIOP) 的相关性进行分析。**结果** 高度近视组最大压陷时顶点距离 (PD) 为 (5.49 ± 0.28) mm, 明显高于中低度近视组的 (5.36 ± 0.28) mm 和健康对照组约 (5.05 ± 0.29) mm, 最大压陷时反向曲率半径 (HCR) 和应力-应变指数 (SSI) 明显低于中低度近视组和健康对照组, 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.05$)。高度近视组 SC-T 面积、SC-N 面积明显大于健康对照组和中低度近视组, TM-T 厚度低于健康对照组和中低度近视组, 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.05$)。近视患者 PD 与 SC-N 面积呈正相关 ($r = 0.26, P = 0.02$)。bIOP 与 PD、最大压陷时的形变幅度 (DA)、综合半径 (IR)、形变比例 (DA ratio) 均呈负相关 ($r = -0.79, -0.81, -0.45, -0.50$, 均 $P = 0.00$), 与第一次压平时间角膜硬度值 (SP-A1)、SSI 呈正相关 ($r = 0.45, 0.46$, 均 $P = 0.00$)。**结论** 近视患者 PD 值较大, 且 PD 越大, SC-N 面积越大; 屈光度越大, AL 越长, TM 厚度越薄。

【关键词】 高度近视; 角膜生物力学; Schlemm 管; 小梁网**基金项目:** 武汉市卫健委科研基金青年项目 (WX21Q34)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20231230-00229

Correlation between corneal biomechanics and Schlemm canal and trabecular meshwork morphology in myopiaYang Dandan¹, Yin He¹, Peng Yilin¹, Wang Junming²¹EyeGood Ophthalmic Hospital, Wuhan 430014, China; ²Department of Ophthalmology, The Second Affiliated Hospital of Guangzhou Medical University, Guangzhou 510260, China

Corresponding author: Wang Junming, Email: eyedrwjm@163.com

【Abstract】 Objective To evaluate the correlation between corneal biomechanical parameters and Schlemm canal (SC) and trabecular meshwork (TM) in patients with myopia. **Methods** Eighty-one consecutive patients who underwent refractive surgery at Wuhan EyeGood Ophthalmology Hospital from May to December 2021 were enrolled. Patients were divided into two groups according to spherical equivalent (SE) and axial length (AL), including 39 patients with 39 eyes in low to moderate myopia group (SE: -0.5 to -6.0 D, AL < 26 mm) and 42 patients with 42 eyes in high myopia group (SE ≤ -6.0 D, AL ≥ 26 mm). Another 20 cases (20 eyes) from the same period of health examinations were included as a healthy control group, with 10 males and 10 females. All subjects' right eye data were included for analysis. The corneal biomechanical parameters were measured with Corvis ST. The morphology of the SC and TM was observed with Zeiss Cirrus HD-OCT 5000. The differences in corneal biomechanical parameters, nasal SC (SC-N) area, temporal SC (SC-T) area, nasal TM (TM-N) width and thickness and temporal TM (TM-T) width were compared between the two groups. Correlations between corneal biomechanical parameters and SC, TM and biomechanically corrected intraocular pressure (bIOP) in myopic patients were analyzed using Pearson linear correlation analysis. The study followed the Declaration of Helsinki, and the study protocol was reviewed and approved by the Ethics Committee of Wuhan EyeGood Ophthalmology Hospital (No. AGQGSS-06). All patients were aware of the purpose and significance of this study and voluntarily signed the informed consent form. **Results** The

distance between the two peaks of the cornea at highest concavity (PD) was (5.49 ± 0.28) mm in high myopia group, which was higher than (5.36 ± 0.28) mm in low to moderate myopia and (5.05 ± 0.29) mm in healthy control group, and the radius of curvature at highest concavity (HCR) and the stress-strain index (SSI) values in high myopia group were lower than those in low to moderate myopia and healthy control groups, with statistically significant differences (all $P < 0.05$). The SC-T area and SC-N area were significantly higher and TM-T thickness was lower in high myopia group than those in low to moderate myopia and healthy control groups (all $P < 0.05$). PD was positively correlated with SC-N area in myopic patients ($r = 0.26, P = 0.02$). bIOP was negatively correlated with PD, the amount of corneal displacement at highest degree of concavity (DA), inverse concave radius (IR) and deformation amplitude ratio (DA ratio) ($r = -0.79, -0.81, -0.45, -0.50$; all $P = 0.00$) and positively correlated with stiffness parameters at applanation 1 (SP-A1) and SSI ($r = 0.45, 0.46$; all $P = 0.00$). **Conclusions** PD values are greater in myopic patients. The greater the PD, the greater the SC-N area. The greater the refractive error, the longer the AL, and the thinner the TM thickness.

[Key words] High myopia; Corneal biomechanical; Schlemm canal; Trabecular meshwork

Fund program: Wuhan Municipal Health Commission Research Fund Youth Project (WX21Q34)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20231230-00229

我国近视高发,特别是高度近视,并呈现出低龄化趋势。据统计我国青少年高度近视患病率为 6.69%~38.4%^[1-2],青年少儿童的近视防控已经成为热点话题。高度近视容易引起各种并发症,如视网膜变性、视网膜脱离、黄斑出血、青光眼等,导致视功能的损害,从而引起视力不可逆的损伤,严重者可致盲。有研究报道,高度近视患者角膜生物力学的特征变化可能是引起相关眼病并发症的原因之一;高度近视因特殊的眼球结构易引起相关眼部并发症,这与其角膜生物力学的特征有一定的关系^[3]。同时,高度近视患者也是原发性开角型青光眼(primary open-angle glaucoma, POAG)的易感人群,但其发病机制尚不明确^[4]。Corvis ST 是一种新型的非接触性角膜生物力学测量仪,其测量角膜生物力学有较好的一致性和重复性^[5]。有研究显示,高度近视患者与健康对照眼相比有着更大的最大压陷时的形变幅度(the amount of corneal displacement at highest degree of concavity, DA)和更小的最大压陷时的反向曲率半径(radius of curvature at highest concavity, HCR)^[6-7]。也有研究报道角膜 DA 越高,眼筛板对眼压变化的反应越强,这种类型眼在眼压升高和视神经乳头发生改变时更容易发生青光眼^[8-9]。开角型青光眼主要的病因是房水流出的阻力增加,房水流出阻力部位是 Schlemm 管(Schlemm canal, SC)和小梁网(trabecular meshwork, TM)^[10]。有研究表明不同屈光度、不同年龄人群的 SC 和 TM 的大小和形态也会有所不同^[11-12]。目前,国内外尚缺乏关于 SC 和 TM 形态与角膜生物力学相关性的研究。本研究旨在通过比较不同程度近视患者 SC 和 TM 形态,以及角膜生物力学特征,并分析其相关性,从而更深入地认识近视患者的角膜和房角特征,及其与眼压的关系。

1 资料与方法

1.1 一般资料

采用横断面研究设计,连续纳入 2021 年 5—12 月就诊于武汉艾格眼科医院屈光手术科的近视患者 81 例 81 眼,其中男 40 例 40 眼,女 41 例 41 眼。根据等效球镜度数(spherical equivalent, SE)及眼轴长度(axial length, AL)将患者分为中低度近视组(SE 为 $-0.5 \sim -6.0$ D, $AL < 26$ mm)39 例和高度近视组(SE < -6.0 D, $AL \geq 26$ mm)42 例。纳入同期健康体检人群 20 例 20 眼作为健康对照组,其中男 10 例 10 眼,女 10 例 10 眼。均纳入右眼数据进行分析。各组间年龄、性别、眼压和中央角膜厚度(central corneal thickness, CCT)比较差异无统计学意义($F = 0.11, 4.57, 1.17, 2.90$, 均 $P > 0.05$) (表 1)。纳入标准:(1) 18~45 岁;(2) 眼压 ≤ 21 mmHg;(3) 无眼部手术史;(4) 软性接触镜佩戴者至少停戴 1 周,硬性接触镜至少停戴 3 周,角膜塑形镜停戴 3 个月以上。排除标准:(1) 有眼部器质性病变、圆锥角膜、视神经病变、白内障、青光眼家族史等者;(2) 患有糖尿病、甲状腺功能亢进、全身免疫性疾病者以及妊娠、哺乳期女性。本研究遵循《赫尔辛基宣言》,研究方案经武汉艾格眼科医院伦理委员会审核批准(批文号:AGQGSS-06)。所有患者均知晓本研究的目的和意义,自愿签署相关知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 眼科检查 常规视力、眼压、综合验光、最佳矫正视力检查、裂隙灯显微镜检查、检眼镜检查;应用 Pentacam (德国 Oculus 公司)测量 CCT;应用 IOLMaster 500 (德国 Carl Zeiss 公司)测量 AL。

1.2.2 角膜生物力学检查 应用 Corvis ST (德国

表 1 各组一般资料及眼部检查结果比较
Table 1 Comparison of general information and ocular examination results among different groups

组别	眼数	年龄 ($\bar{x} \pm s$, 岁)	性别构成 (n, 男/女)	SE ($\bar{x} \pm s$, D)	AL ($\bar{x} \pm s$, mm)	眼压 ($\bar{x} \pm s$, mmHg)	CCT ($\bar{x} \pm s$, μm)
健康对照组	20	25.3 $\pm$ 3.9	10/10	-0.20 $\pm$ 0.11	23.3 $\pm$ 0.51	15.8 $\pm$ 2.9	543.0 $\pm$ 25.2
中低度近视组	39	25.5 $\pm$ 7.5	18/21	-4.29 $\pm$ 1.11 ^a	25.10 $\pm$ 0.63 ^a	16.7 $\pm$ 2.5	528.5 $\pm$ 34.2
高度近视组	42	25.6 $\pm$ 4.9	22/20	-7.65 $\pm$ 1.12 ^{ab}	26.78 $\pm$ 0.45 ^{ab}	16.8 $\pm$ 2.1	538.1 $\pm$ 23.3
F 值		0.11	4.57	13.53	167.10	1.17	2.90
P 值		0.91	0.10	<0.001	<0.001	0.31	0.07

注:与健康对照组比较,^a $P<0.05$;与中低度近视组比较,^b $P<0.05$ (单因素方差分析,LSD- t 检验) SE:等效球镜度数;AL:眼轴长度;CCT:中央角膜厚度

Note: Compared with healthy control group, ^a $P<0.05$; compared with low to moderate myopia group, ^b $P<0.05$ (One-way ANOVA, LSD- t test) SE: spherical equivalent; AL: axial length; CCT: central corneal thickness

Oculus 公司)测量角膜生物力学参数。检查在暗室中进行,嘱受检者下颌置于下颌托上,注视仪器中的视标,检查者对焦后自动完成测量。记录的参数包括:DA、HCR、最大压陷时的顶点距离(distance between the two peaks of the cornea at highest concavity, PD)、第一次压平时间角膜硬度值(stiffness parameters at applanation 1, SP-A1)、综合半径(inverse concave radius, IR)、形变比例(deformation amplitude ratio, DA ratio)、角膜厚度变异(Ambrosio relational thickness horizontal, ARTh)、Corvis ST 生物力学指数(Corvis biomechanical index, CBI)、应力-应变指数(stress-strain index, SSI)、生物力学校正眼压(biomechanically corrected intraocular pressure, bIOP)。所有受检者的检查均由同一位经验丰富的医师完成,重复测量 3 次,选择质量较好的结果作为最终测量值。

1.2.3 SC 和 TM 的测量 采用光学相干断层扫描仪(Cirrus HD-OCT 5000 型,德国 Carl Zeiss 公司)扫描眼前节(加置角膜镜头)并拍照,每次测量时均要固定好受检者的头位和眼位,使同一受检者每次检查的眼位保持一致,采用固定指示灯的方式来固定受检者的眼位。采用 ImageJ 软件测量图像中受检者颞侧方 SC 面积(SC-T)和鼻侧方 SC 面积(SC-N)、颞侧方 TM (TM-T)和鼻侧方 TM (TM-N)的宽度和厚度。本研究将巩膜突(SS)定义为睫状体和小梁网之间的交点, Schwalbe 线(SL)定义为角膜内皮(亮)与小梁网(暗)之间的边界(图 1)。SC 横截面积为图 1 中黄线围绕区域,通常为泪滴状,厚度和高度较前端大。SC 的水平直径为黑色阴影区前一个端点至后一个端点的距离。TM 宽度为 SS 到 SL 的距离, TM 厚度为 SC 前部端点与中点垂直于网格内层距离的平均值(图 1 中蓝线)。所有测量均由同一位医师完成,重复测量 3 次,

每次测量误差范围不超过 15%,取平均值。

1.3 统计学方法

采用 SPSS 18.0 统计学软件进行统计分析。采用 Kolmogorov-Smirnov 方法进行正态性检验,符合正态分布的数据资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示。各组间不同测量参数差异比较均采用单因素方差分析,组间两两比较采用 LSD- t 检验;采用 Pearson 线性相关分析对近视患者角膜生

物力学参数与 SC、TM、bIOP 的相关性进行分析。采用双侧检验, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 各组患者角膜生物力学参数的比较

健康对照组、中低度近视组、高度近视组 PD、HCR、SSI 总体比较,差异均有统计学意义($F=7.40$ 、 3.57 、 13.40 ,均 $P<0.05$);高度近视组 PD 明显高于中低度近视组和健康对照组, HCR 和 SSI 明显低于中低度近视组和健康对照组,差异均有统计学意义(均 $P<0.05$)。3 个组间 DA、SP-A1、IR、DA ratio、ARTh、CBI 比较,差异均无统计学意义(均 $P>0.05$)(表 2)。

2.2 各组 SC 面积、TM 宽度和厚度的比较

健康对照组、中低度近视组、高度近视组的 SC-T 面积、SC-N 面积、TM-T 厚度总体比较,差异均有统计学意义($F=4.93$ 、 5.85 、 5.10 ,均 $P<0.05$);其中,高度

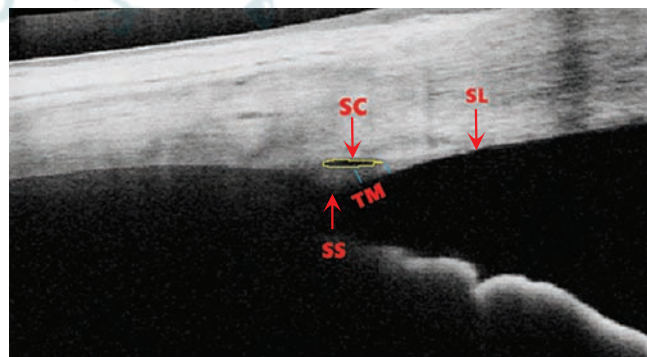


图 1 SC 及 TM 的形态 黄线围绕区域为 SC 横截面,蓝线为 TM 厚度,SS 到 SL 的距离为 TM 宽度 SC:Schlemm 管;SL:Schwalbe 线;SS:巩膜突;TM:小梁网

Figure 1 Morphology of SC and TM The area surrounded by the yellow line was the SC cross-section. The blue line was the TM thickness, and the distance from SS to SL was the TM width SC:Schlemm canal; SL:Schwalbe line; SS:scleral spur; TM:trabecular meshwork

近视组 SC-T 面积、SC-N 面积明显大于健康对照组和中低度近视组, TM-T 厚度低于健康对照组和中低度近视组, 差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$)。3 个组间 TM-T 宽度、TM-N 宽度、TM-N 厚度比较差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$)(表 3)。

2.3 近视患者角膜生物力学参数、AL、SE 与 SC 面积、TM 宽度和厚度的相关性分析

PD 与 SC-N 面积呈正相关($r = 0.26, P = 0.02$)。SE 与 TM-T 厚度呈正相关($r = 0.24, P = 0.03$), AL 与

TM-T 厚度和 TM-N 厚度均呈负相关($r = -0.36, -0.22, P < 0.01, P = 0.04$)(表 4, 图 2)。

2.4 近视患者角膜生物力学参数和 bIOP 的相关性分析

PD、DA、IR、DA ratio 均与 bIOP 呈负相关($r = -0.79, -0.81, -0.45, -0.50$, 均 $P < 0.01$), SP-A1、SSI 均与 bIOP 呈正相关($r = 0.45, 0.46$, 均 $P < 0.01$)(图 3)。HCR、ARTh 和 CBI 与 bIOP 无明显相关性($r = 0.17, -0.16, -0.06$, 均 $P > 0.05$)。

表 2 各组角膜生物力学参数的比较($\bar{x} \pm s$)

Table 2 Comparison of corneal biomechanical parameters among three groups ($\bar{x} \pm s$)

组别	眼数	PD (mm)	HCR (mm)	DA (mm)	SP-A1	IR	DA ratio	ARTh	CBI	SSI
健康对照组	20	5.05±0.29	8.19±0.34	1.10±0.10	117.7±11.9	7.1±0.4	3.8±0.2	698.9±102.7	0.00±0.00	1.07±0.12
中低度近视组	39	5.36±0.28 ^a	7.98±1.03 ^a	1.11±0.12	105.7±16.3	7.5±1.0	3.9±0.4	598.6±138.7	0.02±0.10	0.83±0.14 ^a
高度近视组	42	5.49±0.28 ^{ab}	7.65±0.88 ^{ab}	1.12±0.10	107.5±9.9	7.4±1.1	3.8±0.4	638.1±121.2	0.00±0.01	0.77±0.13 ^{ab}
F 值		7.40	3.57	0.27	1.90	2.30	0.60	2.04	1.27	13.40
P 值		<0.001	0.03	0.77	0.15	0.10	0.55	0.14	0.21	<0.001

注:与健康对照组比较,^a $P < 0.05$;与中低度近视组比较,^b $P < 0.05$ (单因素方差分析,LSD- t 检验) PD:最大压陷时的顶点距离;HCR:最大压陷时的反向曲率半径;DA:最大压陷时的形变幅度;SP-A1:第一次压平时间角膜硬度值;IR:综合半径;DA ratio:形变比例;ARTh:角膜厚度变异;CBI:Corvis ST 生物力学指数;SSI:应力-应变指数

Note:Compared with healthy control group,^a $P < 0.05$;compared with low to moderate myopia group,^b $P < 0.05$ (One-way ANOVA,LSD- t test) PD:distance between the two peaks of the cornea at highest concavity;HCR:radius of curvature at highest concavity;DA:the amount of corneal displacement at highest degree of concavity;SP-A1:stiffness parameters at applanation 1;IR:inverse concave radius;DA ratio:deformation amplitude ratio;ARTh:Ambrosio relational thickness horizontal;CBI:Corvis biomechanical index;SSI:stress-strain index

表 3 各组 SC 管面积、TM 宽度和厚度的比较($\bar{x} \pm s$)

Table 3 Comparison of SC area, TM width and thickness among three groups ($\bar{x} \pm s$)

组别	眼数	SC-T 面积(μm^2)	SC-N 面积(μm^2)	TM-T 宽度(μm)	TM-N 宽度(μm)	TM-T 厚度(μm)	TM-N 厚度(μm)
健康对照组	20	2 711.3±1 200.5	3 571.8±579.0	659.7±83.2	714.3±78.3	109.6±23.0	105.8±24.9
中低度近视组	39	4 079.5±1 964.8	4 315.6±1 966.2	738.9±123.3	711.0±115.0	112.7±22.5	107.2±22.1
高度近视组	42	5 389.7±3 342.6 ^{ab}	6 056.2±3 124.3 ^{ab}	725.0±102.9	699.5±97.5	95.8±29.2 ^b	98.8±27.2
F 值		4.93	5.85	1.32	0.14	5.10	2.00
P 值		0.01	<0.001	0.27	0.87	0.01	0.14

注:与健康对照组比较,^a $P < 0.05$;与中低度近视组比较,^b $P < 0.05$ (单因素方差分析,LSD- t 检验) SC:Schlemm 管;TM:小梁网;T:颞侧;N:鼻侧

Note:Compared with healthy control group,^a $P < 0.05$;compared with low to moderate myopia group,^b $P < 0.05$ (One-way ANOVA,LSD- t test) SC:Schlemm canal;TM:trabecular meshwork;T:temporal;N:nasal

表 4 近视组角膜生物力学参数、SE、AL 与 SC 面积、TM 宽度和厚度的相关性

Table 4 Correlation of corneal biomechanical parameters, SE, AL and SC, TM width and thickness in myopia group

	PD (mm)		HCR (mm)		SSI		SE (D)		AL (mm)	
	r 值	P 值	r 值	P 值	r 值	P 值	r 值	P 值	r 值	P 值
SC-T 面积(μm^2)	0.09	0.40	0.00	0.99	-0.11	0.33	-0.14	0.21	0.19	0.10
SC-N 面积(μm^2)	0.26	0.02	-0.20	0.86	-0.16	0.15	-0.18	0.11	0.19	0.09
TM-T 宽度(μm)	-0.19	0.94	0.07	0.52	0.08	0.46	0.09	0.42	-0.02	0.86
TM-N 宽度(μm)	0.09	0.44	0.16	0.16	0.09	0.42	0.04	0.69	-0.03	0.80
TM-T 厚度(μm)	0.19	0.10	-0.17	0.13	-0.18	0.11	0.24	0.03	-0.36	<0.01
TM-N 厚度(μm)	0.05	0.66	-0.08	0.50	-0.12	0.31	0.18	0.11	-0.22	0.04

注:(Pearson 相关分析, $n = 81$) PD:最大压陷时的顶点距离;HCR:最大压陷时的反向曲率半径;SSI:应力-应变指数;SE:等效球镜度数;AL:眼轴长度;SC:Schlemm 管;TM:小梁网;T:颞侧;N:鼻侧

Note:(Pearson correlation analysis, $n = 81$) PD:distance between the two peaks of the cornea at highest concavity;HCR:radius of curvature at highest concavity;SSI:stress-strain index;SE:spherical equivalent;AL:axial length;SC:Schlemm canal;TM:trabecular meshwork;T:temporal;N:nasal

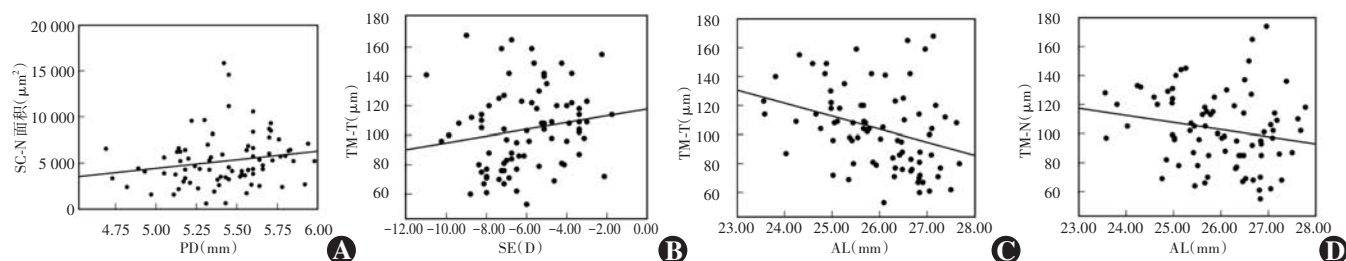


图 2 近视患者角膜生物力学参数、SE、AL 与 SC 和 TM 宽度和厚度相关性散点图 (Pearson 相关分析, $n=81$) A: PD 与 SC-N 面积散点图 ($r=0.26, P=0.02$) B: SE 与 TM-T 厚度散点图 ($r=0.24, P=0.03$) C: AL 与 TM-T 厚度散点图 ($r=-0.36, P<0.01$) D: AL 与 TM-N 厚度散点图 ($r=-0.22, P=0.04$) PD: 最大压陷时的顶点距离; SE: 等效球镜度数; AL: 眼轴长度; SC: Schlemm 管; TM: 小梁网; T: 颞侧; N: 鼻侧

Figure 2 Scatter plot of the correlation between corneal biomechanical parameters, SE, AL and SC and TM width and thickness in patients with myopia (Pearson correlation analysis, $n=81$) A: Scatter plot of PD and SC-N area ($r=0.26, P=0.02$) B: Scatter plot of SE and TM-T thickness ($r=0.24, P=0.03$) C: Scatter plot of AL and TM-T thickness ($r=-0.36, P<0.01$) D: Scatter plot of AL and TM-N thickness ($r=-0.22, P=0.04$) PD: distance between the two peaks of the cornea at highest concavity; SE: spherical equivalent; AL: axial length; SC: Schlemm canal; TM: trabecular meshwork; T: temporal; N: nasal

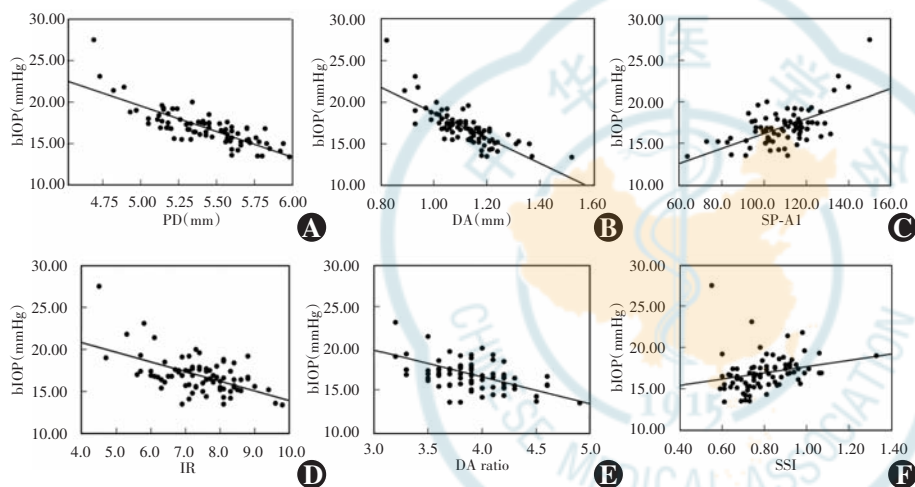


图 3 近视患者角膜生物力学参数与 bIOP 的相关性散点图 (Pearson 相关分析, $n=81$) A: PD 与 bIOP 散点图 ($r=-0.79, P<0.01$) B: DA 与 bIOP 散点图 ($r=-0.81, P<0.01$) C: SP-A1 与 bIOP 散点图 ($r=0.45, P<0.01$) D: IR 与 bIOP 散点图 ($r=-0.45, P<0.01$) E: DA ratio 与 bIOP 散点图 ($r=-0.50, P<0.01$) F: SSI 与 bIOP 散点图 ($r=0.46, P<0.01$) bIOP: 生物力学校正眼压; PD: 最大压陷时的顶点距离; DA: 最大压陷时的形变幅度; SP-A1: 第一次压平时间角膜硬度值; IR: 综合半径; DA ratio: 形变比例; SSI: 应力-应变指数

Figure 3 Scatter plot of the correlation between corneal biomechanical parameters and bIOP in patients with myopia (Pearson correlation analysis, $n=81$) A: Scatter plot of PD and bIOP ($r=-0.79, P<0.01$) B: Scatter plot of DA and bIOP ($r=-0.81, P<0.01$) C: Scatter plot of SP-A1 and bIOP ($r=0.45, P<0.01$) D: Scatter plot of IR and bIOP ($r=-0.45, P<0.01$) E: Scatter plot of DA ratio and bIOP ($r=-0.50, P<0.01$) F: Scatter plot of SSI and bIOP ($r=0.46, P<0.01$) bIOP: biomechanically corrected intraocular pressure; PD: distance between the two peaks of the cornea at highest concavity; DA: the amount of corneal displacement at highest degree of concavity; SP-A1: stiffness parameters at applanation 1; IR: inverse concave radius; DA ratio: deformation amplitude ratio; SSI: stress-strain index

3 讨论

近年来,越来越多研究关注高度近视眼角膜生物力学和青光眼的联系。有研究显示,高度近视患者与青光眼患者的角膜生物力学相似^[7]。以往的研究已经证实, Covis ST 测量近视患者的角膜生物力学参数具有良好的精确性和重复性^[13]; Cirrus HD-OCT 5000 型观察 SC 和 TM 形态的精确性和可重复性,在以往的研究中也得到了证实^[14]。本研究通过这 2 种仪器测

量近视患者角膜生物力学以及 SC 和 TM 形态,并分析二者的相关性,从而更进一步地认识高度近视和青光眼之间的关系。

本研究纳入角膜生物力学 3 个基础参数和 6 个整合参数,分别为: PD、HCR、DA、SP-A1、IR、DA ratio、ARTh、CBI、SSI; 这些参数已被证实健康人群中受到角膜厚度和眼压的影响,不同的屈光度对应的角膜生物力学参数也不同^[15-16]。角膜 PD、HCR 与形变阻力相关, PD 值越大、HCR 值越小,提示角膜更易发生形变^[17-18]。有研究证实,高度近视患者 PD 值较中低度近视患者大, HCR 较低度近视小,与本次研究结果一致^[19]。SSI 是反映角膜材料刚性的新参数, SSI 值越大,意味着角膜越坚硬。本研究发现近视患者 SSI 值较健康对照偏低,且高度近视组 SSI 值低于

中低度近视组,与 Han 等^[20]的研究结果相一致;综合以上推测近视患者角膜生物力学已发生改变,其中高度近视眼角膜更软,易发生形变。高度近视患者 AL 长,巩膜 I 型胶原蛋白合成减少,蛋白多糖和细胞外基质降解,巩膜胶原纤维束的直径缩小,巩膜明显变薄,巩膜的力学性能也会相应减弱^[21]。由于角膜基质是巩膜的延续,巩膜的扩张可能导致角膜硬度的降低。有研究显示,角膜偏软是发生青光眼和青光眼恶化的风险因素^[19,22]。相比健康对照者,青光眼患者具有较

大的 PD 值^[23-24]。研究已证实,角膜、巩膜、筛板都是由连续的细胞外基质组成,它们之间的生物力学相互关联^[25]。角膜的弹性在一定程度上可反映巩膜和筛板的生物力学特性,这也提示了高度近视在并发青光眼时,视神经的耐受力较单纯青光眼患者低。

高眼压一直被认为是 POAG 的危险因素,房水流出通道阻力的增加是眼压增高的主要原因之一。SC 和 TM 是房水流出通道的重要组成部分。有研究发现,POAG 患者 Schlemm 管的面积和管腔数量小于健康对照,小梁网厚度薄于健康对照^[12,26]。本研究发现,高度近视患者 SC 面积较健康对照偏大,TM 厚度较健康对照偏小,和既往的研究结果一致^[10,14]。本研究首次分析近视患者角膜生物力学与 SC 和 TM 形态的相关性,证实了近视患者 SC-N 面积与角膜 PD 存在正相关,TM-T 厚度与 SE 和 AL 呈负相关,有助于我们更好地认识高度近视的眼球特征及其与青光眼的相关性。结合既往研究,推测高度近视 SC 面积偏大的原因有以下几点:(1)高度近视患者 AL 变长,可能会引起 SC 扩张。(2)高度近视患者胶原纤维的减少造成 SC 管周围的胶原纤维结构及生物力学性质降低,导致 SC 扩张^[10]。(3)变形和不规则的眼球形状可能导致高度近视眼巩膜内积液管病变和阻塞,从而导致 SC 远端阻力增加,引起 SC 扩张^[27],增加了高度近视发生 POAG 的风险,未来还需要进一步的研究验证。然而,本研究和 Chen 等^[10]研究结果均显示,近视患者 SC 面积与 SE 无明显的线性相关,推测 SC 面积大小与屈光度并非简单的线性相关。

本研究也证实了高度近视患者颞侧 TM 更薄,可能有以下几点原因:(1)高度近视患者 AL 较长,导致视网膜、脉络膜、巩膜的拉伸,从而使 TM 变薄,且本研究也证实了 TM 的厚度与 AL 呈负相关,与 SE 呈正相关。(2)高度近视眼房水中的代谢物发生了显著变化,可能导致高度近视患者小梁网偏薄^[28]。(3)房水流出物是节段性的,非活跃区 TM 变薄^[29-30],这意味着高度近视眼的 TM 活跃性下降。

2016 年 Corvis ST 推出了 bIOP,校正了角膜厚度、年龄、角膜生物力学对眼压的影响,从而得到更接近真实的眼压值^[31]。本研究发现,高度近视患者 bIOP 与 PD、DA、DA ratio、IR、SPA1、SSI 均有显著相关性。国内研究者对 POAG 的角膜生物力学进行研究,均发现 DA、PD 与 bIOP 呈负相关^[32-33]。

本次研究尚存在较多不足:首先,样本量较少,年龄跨度不大,缺少低龄和高龄患者,未来需扩大样本量进一步分析不同年龄段患者角膜生物力学特征。其

次,本研究仅纳入鼻侧和颞侧 SC 和 TM 形态数据,缺少其他方位的观察,未来可全方位的观察 SC 和 TM 形态,以全面了解 SC 和 TM 的变化。最后,本研究只限于形态学的研究,没有相关功能学参数的研究,如房水流畅系数 C。

综上所述,本次研究对健康对照和近视患者角膜生物力学参数和 SC、TM 形态特征进行比较分析,发现相比中低度近视,高度近视角膜偏软,通过分析角膜生物力学参数与 SC 和 TM 大小的相关性,首次发现近视患者 PD 越大,SC-N 面积越大;随着近视度数的增加,AL 增长,TM-T 厚度越薄。从而将角膜生物力学与 SC 和 TM 的大小关联起来,这有助于了解高度近视和 POAG 之间的密切关系。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

作者贡献声明 杨丹丹:酝酿和设计试验、实施研究、采集数据、分析/解释数据、起草文章、统计分析;尹禾:实施研究、对文章的知识性内容作批评性审阅;彭祎琳:采集数据;王军明:酝酿和设计试验、指导研究、文章审阅及定稿

参考文献

- [1] Li Y, Liu J, Qi P. The increasing prevalence of myopia in junior high school students in the Haidian District of Beijing, China: a 10-year population-based survey[J/OL]. BMC Ophthalmol, 2017, 17(1): 88. [2024-07-26] <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28606071>. DOI:10.1186/s12886-017-0483-6.
- [2] Sun J, Zhou J, Zhao P, et al. High prevalence of myopia and high myopia in 5060 Chinese university students in Shanghai[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2012, 53(12): 7504-7509. DOI:10.1167/iov.11-8343.
- [3] Piñero DP, Alcón N. Corneal biomechanics: a review[J]. Clin Exp Optom, 2015, 98(2): 107-116. DOI:10.1111/exo.12230.
- [4] Pan CW, Cheung CY, Aung T, et al. Differential associations of myopia with major age-related eye diseases: the Singapore Indian Eye Study[J]. Ophthalmology, 2013, 120(2): 284-291. DOI:10.1016/j.ophtha.2012.07.065.
- [5] Nemeth G, Hassan Z, Csutak A, et al. Repeatability of ocular biomechanical data measurements with a Scheimpflug-based noncontact device on normal corneas[J]. J Refract Surg, 2013, 29(8): 558-563. DOI:10.3928/1081597X-20130719-06.
- [6] Wang J, Li Y, Jin Y, et al. Corneal biomechanical properties in myopic eyes measured by a dynamic Scheimpflug analyzer[J/OL]. J Ophthalmol, 2015, 2015: 161869[2024-07-26]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26576291>. DOI:10.1155/2015/161869.
- [7] He M, Wang W, Ding H, et al. Corneal biomechanical properties in high myopia measured by dynamic Scheimpflug imaging technology[J]. Optom Vis Sci, 2017, 94(12): 1074-1080. DOI:10.1097/OPX.0000000000001152.
- [8] Díez-Álvarez L, Muñoz-Negrete FJ, Casas-Llera P, et al. Relationship between corneal biomechanical properties and optic nerve head changes after deep sclerectomy[J]. Eur J Ophthalmol, 2017, 27(5): 535-541. DOI:10.5301/ejo.5000955.
- [9] Lanzagorta-Aresti A, Perez-Lopez M, Palacios-Pozo E, et al. Relationship between corneal hysteresis and lamina cribrosa displacement after medical reduction of intraocular pressure[J]. Br J

- Ophthalmol, 2017, 101 (3) : 290 - 294. DOI: 10. 1136/bjophthalmol-2015-307428.
- [10] Hong J, Xu J, Wei A, et al. Spectral-domain optical coherence tomographic assessment of Schlemm's canal in Chinese subjects with primary open-angle glaucoma [J]. Ophthalmology, 2013, 120 (4) : 709-715. DOI: 10. 1016/j. ophtha. 2012. 10. 008.
- [11] Chen Z, Song Y, Li M, et al. Schlemm's canal and trabecular meshwork morphology in high myopia [J]. Ophthalmic Physiol Opt, 2018, 38 (3) : 266-272. DOI: 10. 1111/opo. 12451.
- [12] Chen Z, Sun J, Li M, et al. Effect of age on the morphologies of the human Schlemm's canal and trabecular meshwork measured with swept-source optical coherence tomography [J]. Eye (Lond), 2018, 32 (10) : 1621-1628. DOI: 10. 1038/s41433-018-0148-6.
- [13] 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 [J]. 中华实验眼科杂志, 2019, 37 (12) : 990-994. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 2095-0160. 2019. 12. 011.
- Ren SW, Yang KL, Xu LY, et al. Repeatability of new Corvis ST parameters and influencing factors in myopia patients [J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2019, 37 (12) : 990-994. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 2095-0160. 2019. 12. 011.
- [14] Yang DD, Chen ZQ, Chen W, et al. Changes in Schlemm's canal, trabecular meshwork, and relevant parameters in the early stage after SMILE of myopia patients [J]. Int J Ophthalmol, 2022, 15 (2) : 291-298. DOI: 10. 18240/ijo. 2022. 02. 15.
- [15] Vinciguerra R, Elsheikh A, Roberts CJ, et al. Influence of pachymetry and intraocular pressure on dynamic corneal response parameters in healthy patients [J]. J Refract Surg, 2016, 32 (8) : 550-561. DOI: 10. 3928/1081597X-20160524-01.
- [16] Frings A, Linke SJ, Bauer EL, et al. Effects of laser in situ keratomileusis (LASIK) on corneal biomechanical measurements with the Corvis ST tonometer [J]. Clin Ophthalmol, 2015, 9 : 305-311. DOI: 10. 2147/OPHTH. S76491.
- [17] Long W, Zhao Y, Hu Y, et al. Characteristics of corneal biomechanics in chinese preschool children with different refractive status [J]. Cornea, 2019, 38 (11) : 1395-1399. DOI: 10. 1097/ICO. 0000000000001971.
- [18] Esporcatte L, Salomão MQ, Lopes BT, et al. Biomechanical diagnostics of the cornea [J/OL]. Eye Vis (Lond), 2020, 7 : 9 [2024-08-02]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32042837>. DOI: 10. 1186/s40662-020-0174-x.
- [19] Miki A, Yasukura Y, Weinreb RN, et al. Dynamic Scheimpflug ocular biomechanical parameters in healthy and medically controlled glaucoma eyes [J]. J Glaucoma, 2019, 28 (7) : 588-592. DOI: 10. 1097/IJG. 0000000000001268.
- [20] Han F, Li M, Wei P, et al. Effect of biomechanical properties on myopia: a study of new corneal biomechanical parameters [J/OL]. BMC Ophthalmol, 2020, 20 (1) : 459 [2024-08-02]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33213408>. DOI: 10. 1186/s12886-020-01729-x.
- [21] Zhang C, Tatham AJ, Abe RY, et al. Corneal hysteresis and progressive retinal nerve fiber layer loss in glaucoma [J]. Am J Ophthalmol, 2016, 166 : 29-36. DOI: 10. 1016/j. ajo. 2016. 02. 034.
- [22] Li BB, Cai Y, Pan YZ, et al. Corneal biomechanical parameters and asymmetric visual field damage in patients with untreated normal tension glaucoma [J]. Chin Med J (Engl), 2017, 130 (3) : 334-339. DOI: 10. 4103/0366-6999. 198920.
- [23] Wang W, Du S, Zhang X. Corneal deformation response in patients with primary open-angle glaucoma and in healthy subjects analyzed by Corvis ST [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2015, 56 (9) : 5557-5565. DOI: 10. 1167/iops. 15-16926.
- [24] Lee R, Chang RT, Wong IY, et al. Novel parameter of corneal biomechanics that differentiate normals from glaucoma [J/OL]. J Glaucoma, 2016, 25 (6) : e603-e609 [2024-08-06]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26035421>. DOI: 10. 1097/IJG. 0000000000000284.
- [25] Wells AP, Garway-Heath DF, Poostchi A, et al. Corneal hysteresis but not corneal thickness correlates with optic nerve surface compliance in glaucoma patients [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2008, 49 (8) : 3262-3268. DOI: 10. 1167/iops. 07-1556.
- [26] Yan X, Li M, Chen Z, et al. Schlemm's canal and trabecular meshwork in eyes with primary open angle glaucoma: a comparative study using high-frequency ultrasound biomicroscopy [J/OL]. PLoS One, 2016, 11 (1) : e0145824 [2024-08-06]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26726880>. DOI: 10. 1371/journal.pone. 0145824.
- [27] Carreon T, van der Merwe E, Fellman RL, et al. Aqueous outflow - a continuum from trabecular meshwork to episcleral veins [J]. Prog Retin Eye Res, 2017, 57 : 108-133. DOI: 10. 1016/j. preteyeres. 2016. 12. 004.
- [28] Ji Y, Rao J, Rong X, et al. Metabolic characterization of human aqueous humor in relation to high myopia [J]. Exp Eye Res, 2017, 159 : 147-155. DOI: 10. 1016/j. exer. 2017. 03. 004.
- [29] Huang AS, Mohindroo C, Weinreb RN. Aqueous humor outflow structure and function imaging at the bench and bedside: a review [J/OL]. J Clin Exp Ophthalmol, 2016, 7 (4) : 578 [2024-08-06]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27790380>. DOI: 10. 4172/2155-9570. 1000578.
- [30] Vranka JA, Bradley JM, Yang YF, et al. Mapping molecular differences and extracellular matrix gene expression in segmental outflow pathways of the human ocular trabecular meshwork [J/OL]. PLoS One, 2015, 10 (3) : e0122483 [2024-08-06]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25826404>. DOI: 10. 1371/journal.pone. 0122483.
- [31] Sedaghat MR, Momeni-Moghaddam H, Yekta A, et al. Biomechanically-corrected intraocular pressure compared to pressure measured with commonly used tonometers in normal subjects [J]. Clin Optom (Auckl), 2019, 11 : 127-133. DOI: 10. 2147/OPTO. S220776.
- [32] 杜绍林, 黄文彬, 张一弛, 等. 不同房角形态青光眼患者的角膜生物力学特征 [J]. 中华实验眼科杂志, 2016, 34 (10) : 930-935. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 2095-0160. 2016. 10. 015.
- Du SL, Huang WB, Zhang YC, et al. Corneal biomechanical properties in different anterior chamber angle of glaucoma [J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2016, 34 (10) : 930-935. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 2095-0160. 2016. 10. 015.
- [33] 王蕊, 杨瑾, 尹则琳, 等. 不同类型青光眼患者手术前后角膜生物力学变化特征 [J]. 中华实验眼科杂志, 2019, 37 (5) : 382-389. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 2095-0160. 2019. 05. 013.
- Wang R, Yang J, Yin ZL, et al. Changes in corneal biomechanical properties before and after operation in different types of glaucoma [J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2019, 37 (5) : 382-389. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 2095-0160. 2019. 05. 013.
- [34] 张明悦, 张丰菊, 宋彦铮, 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 (2) : 103-109. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 0412-4081. 2020. 02. 005.
- Zhang MY, Zhang FJ, Song YZ, et al. Assessment of corneal biomechanical changes after small incision lenticule extraction with Pentacam and Corvis ST [J]. Chin J Ophthalmol, 2020, 56 (2) : 103-109. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 0412-4081. 2020. 02. 005.

(收稿日期: 2024-10-14 修回日期: 2025-04-17)

(本文编辑: 张宇 骆世平)

