

筛板生物力学改变与正常眼压性青光眼相关性研究

师远江^{1,2}, 何潜雄², 陈雁南², 陈培文², 陈鑫^{2,3}, 辛晓蓉^{1,2}

1. 西南医科大学临床医学院, 四川 泸州 646000; 2. 四川省医学科学院·四川省人民医院(电子科技大学附属医院)眼科, 四川 成都 610072;
3. 川北医学院临床医学院, 四川 南充 637000

【摘要】 目的 探讨筛板生物力学在正常眼压性青光眼(normal tension glaucoma, NTG)中的潜在作用机制。方法 纳入 2023 年 2 月至 2024 年 12 月四川省人民医院眼科就诊的 NTG 患者 33 例 64 眼, NTG 疑似者 33 例 64 眼, 健康对照者 33 例 65 眼, 进行了包括 SS-OCT/OCTA 的标准眼科检查, 对比三组间相关指标的差异。结果 与对照组相比, NTG 组及疑似组视杯深度显著增大、筛板前组织厚度(prelaminar tissue thickness, PTT)降低($P<0.001$), 视杯体积扩大, 盘沿面积及视盘周围视网膜神经纤维层厚度(retinal nerve fiber layer, RNFL)厚度明显减少, NTG 组黄斑神经节细胞复合体(ganglion cell complex, GCC)厚度变薄, 整体丢失体积(global loss volume, GLV)及局部丢失体积(focal loss volume, FLV)值升高(均 $P<0.01$), 其中 GCC 平均厚度与视野缺损相关性最强($r=0.410$)。血流分析显示, NTG 患者视盘及黄斑多数区域血流密度降低, 其中视盘 TL 血流密度与视野平均缺损(mean deviation, MD)相关性最强($r=0.464$), GCC 厚度与视盘周围血流密度正相关, GLV/FLV 与血流密度负相关, PTT 与 GCC 厚度正相关, 筛板厚度(lamina cribrosa thickness, LCT)仅与特定区域微循环相关($P<0.05$)。结论 筛板生物力学通过微循环障碍与机械应力协同作用, 形成视网膜神经节细胞(retinal ganglion cells, RGCs)损伤的级联效应, 血管-机械耦合机制在 NTG 发病中起核心作用, 通过多模态影像技术的联合应用解析筛板生物力学改变有助于 NTG 的早期诊断和全程化病情检测。

【关键词】 正常眼压青光眼; 筛板生物力学; 血液循环; 视网膜神经节细胞

【中图分类号】 R775.5 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1672-6170(2026)01-0148-08

Study on the correlation between biomechanical changes of the lamina cribrosa and normal tension glaucoma

SHI Yuan-jiang^{1,2}, HE Qian-xiong², CHEN Yan-nan², CHEN Pei-wen², CHEN Xin^{2,3}, XIN Xiao-rong^{1,2} 1. Clinical Medical School, Southwest Medical University, Luzhou 646000, China; 2. Department of Ophthalmology, Sichuan Academy of Medical Sciences & Sichuan Provincial People's Hospital (Affiliated Hospital of University of Electronic Science and Technology of China), Chengdu 610072, China; 3. Clinical Medical School of North Sichuan Medical College, Nanchong 637000, China

【Corresponding author】 XIN Xiao-rong

【Abstract】 **Objective** To investigate the potential mechanisms of lamina cribrosa biomechanics in normal-tension glaucoma (NTG). **Methods** Thirty-three NTG patients (64 eyes) between February 2023 and December 2024 from the Department of Ophthalmology in our hospital were selected. At the same time, 33 NTG suspects (64 eyes) and 33 healthy controls (65 eyes) were also included. Standard ophthalmic examinations such as swept-source optical coherence tomography (SS-OCT) and OCT angiography (OCTA) were performed. The relative indexes were compared among the three groups. **Results** Compared with the control group, the NTG and suspected groups exhibited significantly increased optic cup depth, reduced prelaminar tissue thickness (PTT) ($P<0.001$), enlarged optic cup volume and decreased rim area as well as reduced peripapillary retinal nerve fiber layer (RNFL) thickness. In the NTG group, macular ganglion cell complex (GCC) thickness was significantly thinner, with elevated global loss volume (GLV) and focal loss volume (FLV) (all $P<0.01$). Among these parameters, GCC average thickness demonstrated the strongest correlation with visual field defects ($r=0.410$). Blood flow analysis revealed reduced blood flow density in most regions of the optic disc and macula in the NTG patients. Notably, temporal-inferior optic disc blood flow density showed the strongest correlation with mean deviation (MD) ($r=0.464$). GCC thickness was positively correlated with peripapillary blood flow density. GLV and FLV were negatively correlated with blood flow density. PTT was positively associated with GCC thickness. Lamina cribrosa thickness was correlated with microcirculation in specific regions ($P<0.05$). **Conclusions** The biomechanics of the lamina cribrosa forms a cas-

[11] 马占山, 柳小平, 王欣, 等. 体外膈肌起搏器联合无创呼吸机治疗中重度慢性阻塞性肺疾病急性加重期患者的效果观察[J]. 大医生, 2024, 9(14): 35-38.

[12] 刘肖肖, 张祥杰. 进阶式早期康复训练对 RICU 机械通气患者成功撤机及肺功能的影响[J]. 现代医药卫生, 2024, 40(16): 2776-2779, 2784.

[13] 四川大学华西医院康复医学中心. 四川大学华西医院应用体外膈肌起搏器辅助脱机困难患者成功撤离呼吸机[J]. 中国医学物理学杂志, 2021, 38(1): 封3.

[14] 钟娟, 侯璐蒙, 李汉斌, 等. 早期肺康复锻炼联合改良气管导管

拔管在机械通气患者撤机护理中的应用效果[J]. 广西医学, 2022, 44(14): 1679-1684.

[15] 何彬, 杨郑, 莫蓓蓓, 等. 护士主导肺康复管理方案在呼吸机依赖患者中的应用研究[J]. 中华护理杂志, 2023, 58(15): 1802-1808.

[16] 郑婧, 谢春. 渐进性早期康复护理在慢性阻塞性肺疾病机械通气并发呼吸机依赖患者中的应用效果[J]. 医疗装备, 2020, 33(8): 181-182.

(收稿日期: 2025-03-08; 修回日期: 2025-06-10)

(本文编辑: 林 赞)

cade effect leading to damage of retinal ganglion cells (RGCs) through the synergistic effect of microcirculatory disturbances and mechanical stress. The vascular-mechanical coupling mechanism plays a central role in NTG pathogenesis. The integration of multimodal imaging techniques for analyzing the biomechanical alterations in the lamina cribrosa can help early diagnosis and longitudinal monitoring of disease progression of NTG.

【Key words】 Normal tension glaucoma; Lamina cribrosa biomechanics; Blood circulation; Retinal ganglion cells

正常眼压性青光眼(normal tension glaucoma, NTG)是一种以非高眼压状态下慢性进行性视神经损伤为特征的致盲性眼病,临床表现为视杯扩大、视网膜神经纤维层(retinal nerve fiber layer, RNFL)变薄及视野缺损^[1]。流行病学研究显示,我国原发性开角型青光眼(primary open angle glaucoma, POAG)患者中 NTG 比例达 70%^[2],提示其已成为我国青光眼防治的核心挑战。光学相干断层扫描血管成像(optical coherence tomography angiography, OCTA)因其无创性、高分辨率及分层定量分析优势^[3],为揭示 NTG 的微血管病理提供了重要工具。筛板作为眼压的主要力学承载结构,其生物力学特性与 NTG 进展密切相关。研究表明,NTG 患者存在明显的筛板结构改变,包括筛板曲率指数升高^[4]、筛板局限性结构缺损等^[5,6]。然而,现有研究多孤立探讨筛板形态或血管参数,对筛板生物力学与黄斑区神经节细胞复合体(ganglion cell complex, GCC)结构动态关联的研究仍存在空白,尤其是生物力学应力与微血管功能障碍的协同机制尚未明确。本研究采用横断面设计,联合扫频源 OCT、OCTA 及自动视野计,对 NTG 患者的筛板形态参数、视盘/黄斑血流密度、GCC 厚度及视野平均缺损(mean deviation, MD)进行回顾性分析,以揭示视网膜微循环与疾病进展的关系,探讨筛板生物力学在 NTG 中的作用机制,以期 NTG 的早期诊断和治疗管理提供一定的临床依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料 本研究纳入 2023 年 2 月至 2024 年 12 月于四川省人民医院眼科就诊的 NTG 组(33 例/64 只眼)、NTG 疑似组(33 例/64 只眼)、健康对照组(33 例/65 只眼),共 99 例/193 只眼,样本量满足理论需求,可确保检验效能 $\geq 80\%$,满足统计学要求。纳入标准:NTG 组符合中国青光眼指南诊断标准(2020 年)^[7]。NTG 疑似组:①未经治疗的校正眼压 ≤ 21 mmHg;②青光眼视盘改变;③房角开放;④视野检查未出现青光眼性视野改变和(或)MD 值 ≥ -6.0 dB。同时于我院选择 33 名健康体检者作为

对照组:①未经治疗的校正眼压 ≤ 21 mmHg;②房角开放;③视野检查结果正常;④无生理性大视杯。所有受检者均满足 BCVA $\geq 20/40$ 且年龄 >18 岁。排除标准:①眼内疾病史或外伤史;②眼内手术史或激光治疗术后;③屈光介质严重浑浊;④无法配合完成相关检查。本研究遵循医学伦理学原则,符合《赫尔辛基宣言》,并通过了四川省医学科学院四川省人民医院医学研究伦理委员会的批准[编号:伦审(研)2024 年第 684 号]。

1.2 检查方法 所有受检者均接受标准化检查:最佳矫正视力(best-corrected visual acuity, BCVA)、眼压、裂隙灯显微镜、房角检查、OCT、视野及 OCTA 检查。视野检查使用德国 Zeiss Humphrey 750i 型自动电脑视野检查仪,采用 24-2 标准阈值检测程序。在检查之前,受检者需提前 5~10 min 进入暗室,以适应暗环境,检查均在自然瞳孔状态下进行。非正视者需屈光矫正至 BCVA,并且所有受检者均进行 1 次练习,以降低因学习适应效应导致的误差。检查结果需同时满足假阳性率 $<15\%$ 、假阴性率 $<15\%$ 、固视丢失率 $<20\%$ 。

OCT 采用北溟·鲲型超高速扫频 OCT(SS-OCT,北京图湃)进行标准化成像,所有检测均由同一操作者完成。该仪器扫描速度为每秒 40 万次,图像质量由内置软件按 1~10 分自动评分,为保障数据可靠性,设置严格纳入标准——仅保留质量评分 ≥ 8 分的优质图像用于后续分析。受试者取坐位固视光标,无需散瞳,屈光矫正至眼底成像清晰。黄斑扫描(GMA 模式):以黄斑为中心 7.0 mm 范围进行扫描,水平中线分割上下半球,获取 GCC 厚度(μm ,含平均/上下半球值),为神经节细胞层、内丛状层和神经纤维层的联合结构,常被用于评估青光眼等疾病导致的视网膜厚度变化。并通过内置软件计算整体丢失体积(global loss volume, GLV)及局部丢失体积(focal loss volume, FLV),分别反映黄斑区 GCC 的弥漫性损伤和局部损伤。见图 1。视盘扫描(3D 模式):以视盘为中心 6.0 mm 范围进行扫描,获取视杯体积(mm^3)、杯盘比(%)、视盘和盘沿面积(mm^2)及视盘周围 RNFL 厚度(μm ,含平均/上下半球值)。筛板参数:所有测量均由同一技术人员完成,通过设备内置工具测量视杯深度,为视盘表面最低点到两端 Bruch 膜开口连线间的垂直距

【基金项目】四川省科技厅重点研发项目(编号:2024YFFK0073);天府峨眉计划资助项目(编号:Z2024018-3);四川省人民医院科研启动项目(编号:30420200027)

【通讯作者】辛晓蓉

离;筛板前组织厚度 (prelaminar tissue thickness, PTT),为筛板前表面到视盘表面的前筛板组织厚度,主要衡量筛板前部视神经组织的结构变化;筛板厚度(lamina cribrosa thickness, LCT) 为筛板后表面深度减去筛板前表面深度,主要反映筛板的压缩程度^[8]。见图 2。

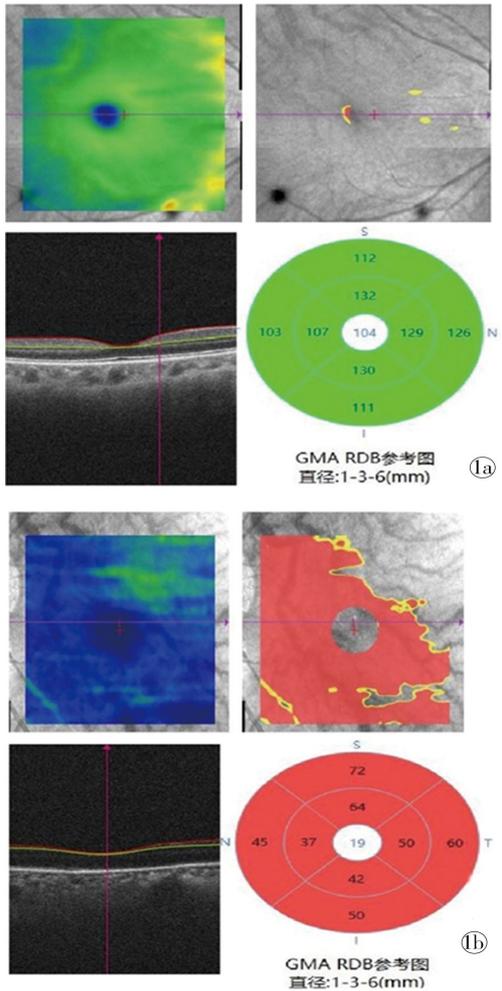


图 1 GMA 分析结果示意图 a:健康对照组,b:NTG 组

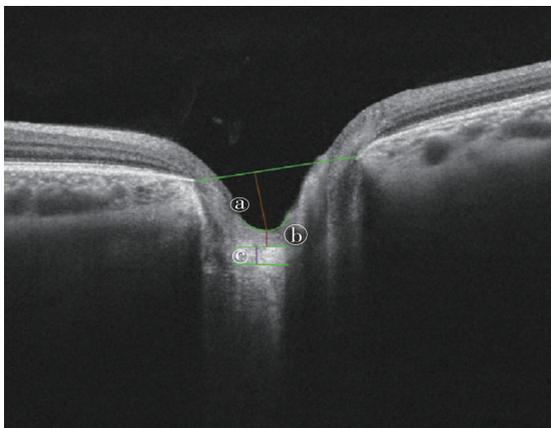


图 2 筛板结构参数测量示意图 a:视杯深度;b:PTT;c:LCT

OCTA 采用北京图湃公司北溟·鲲型超高速扫描 OCT 进行标准化成像,所有检测均由同一操作者

完成。该仪器扫描速度为每秒 40 万次,图像质量由内置软件按 1~10 分自动评分,为保障数据可靠性,设置严格纳入标准——仅保留质量评分 ≥ 8 分的优质图像用于后续分析。受试者取坐姿固定头部,无需散瞳,注视光标并调整屈光至眼底图像清晰。视盘扫描模式:以视盘为中心扫描 6.0mm 范围图像,获取整体、上/下半球及 ETDRS 八分区的 RN-FL 血流密度:上鼻侧 (superior nasal, SN), 上颞侧 (superior temporal, ST), 颞侧上方 (temporal upper, TU), 颞侧下方 (temporal lower, TL), 下颞侧 (inferior temporal, IT), 下鼻侧 (inferior nasal, IN), 鼻侧下方 (nasal lower, NL), 鼻侧上方 (nasal upper, NU)。见图 3。黄斑扫描模式:以中心凹为中心扫描 6.0 mm 范围图像,基于 ETDRS 分区法分层量化:中心凹区(1 mm)、旁中心凹区(3 mm,分鼻/颞/上/下四区)、中心凹周围区(6 mm,分鼻/颞/上/下四区)的表层血流密度。内置软件计算黄斑区 FAZ 周围 300 μm 范围内表层/深层/视网膜血管密度,并计算各层无灌注区面积。

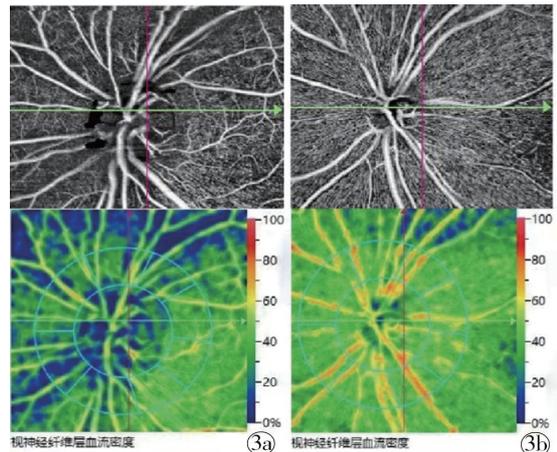


图 3 视盘 RNFL 血流密度示意图 a:NTG 组,b:对照组

1.3 统计学方法 使用 SPSS 29.0 统计学软件进行数据处理和分析,数据正态性经 Kolmogorov-Smirnov 检验判定。当数据符合正态分布时,以均数 \pm 标准差表示,当数据满足方差齐性条件采用单因素 ANOVA 检验,组间差异显著者以 Bonferroni 法多重比较;方差不齐则采用 Welch 校正 ANOVA 结合 Bonferroni 法。当数据不符合正态分布时,以中位数(四分位数间距)表示,采用 Kruskal-Wallis H 检验进行组间比较,差异有统计学意义者则使用 Bonferroni 校正。计数资料采用多因素卡方检验及事后多重比较。相关性分析根据数据分布选用检验方法,若计量资料符合正态分布,采用 Pearson 检验进行相关性分析;若计量资料不符合正态分布,采用 Spearman 检验进行相关性分析。检验水准: $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 三组基本资料分析 三组性别、年龄、身高、体重、眼压差异无统计学意义 ($P>0.05$), 而杯盘比、BCVA、MD 组间差异有统计学意义 (均 $P<0.001$)。

进一步分析表明: 三组间杯盘比差异有统计学意义, NTG 组与疑似组、健康对照组 MD 差异有统计学意义, 与对照组 BCVA 差异有统计学意义 (均 $P<0.001$)。见表 1。

表 1 各组间基本资料比较

项目	NTG 组	NTG 疑似组	健康对照组	统计量	P
年龄(岁)	51.18±11.05	51.42±12.41	46.82±11.90	$F=1.592$	0.209
男/女(n)	17/16	11/22	12/21	$\chi^2=2.601$	0.272
身高(cm)	164.36±7.11	162.76±6.62	165.40±8.11	$F=1.092$	0.340
体重(kg)	59.98±9.23	59.00±8.31	61.76±11.38	$F=0.682$	0.508
眼压(mmHg)	16.27±2.61	15.65(4.03)	15.65±2.16	$H=2.669$	0.263
杯盘比(%)	0.71±0.15	0.55(0.10)	0.30(0.10)	$H=125.978$	<0.001
MD(dB)	-3.00(5.21)	-1.59(3.06)	-1.05±1.22	$H=33.001$	<0.001
BCVA	1.00(0.40)	1.00(0.00)	1.00(0.00)	$H=16.624$	<0.001

2.2 三组视神经 OCT 参数、GMA 参数、筛板结构参数比较 NTG 组视杯体积显著增大, 盘沿面积及视盘周围 RNFL 厚度较疑似组和健康对照组减少 ($P<0.001$)。两两比较显示: NTG 组与疑似组间视杯体积差异无统计学意义, 疑似组与健康对照组间 RNFL 下半球厚度差异无统计学意义 ($P>0.05$), 其余组间参数差异有统计学意义 ($P<0.01$)。筛板生物力学特

征组间比较结果显示, NTG 组与疑似组间视杯深度及 PTT 差异无统计学意义 ($P>0.05$), 但两组视杯深度均显著大于对照组, NTG 组 PTT 显著低于对照组 ($P<0.001$)。见表 2。黄斑区 GCC 厚度在三组间呈梯度变薄 ($P<0.05$), 但 GLV、FLV 仅 NTG 组高于对照组 ($P<0.01$)。见表 3。

表 2 各组间视神经 OCT 参数、筛板结构参数比较

参数	NTG 组	NTG 疑似组	健康对照组	统计量	P
视神经 OCT 参数					
视杯体积(mm^3)	0.36(0.18)	0.28(0.29)	0.12(0.19)	$H=48.626$	<0.001
视盘面积(mm^2)	1.94(0.53)	1.89(0.60)	1.80±0.49	$H=3.689$	0.158
盘沿面积(mm^2)	0.47±0.29	0.63(0.32)	0.97±0.32	$H=67.931$	<0.001
RNFL 平均厚度(μm)	89.80±14.90	100.36±10.60	105.00(16.00)	$H=37.835$	<0.001
RNFL 上半球厚度(μm)	90.20±13.95	100.50(13.00)	107.38±11.02	$H=46.909$	<0.001
RNFL 下半球厚度(μm)	89.91±16.88	99.50(12.50)	104.53±10.84	$H=27.641$	<0.001
筛板结构参数					
视杯深度(μm)	379.70±110.52	368.39±133.41	231.17±178.21	$F=17.256$	<0.001
PTT(μm)	92.63±44.31	94.50(52.00)	153.00(122.00)	$H=47.687$	<0.001
LCT(μm)	145.47±32.31	146.19±30.57	140.00(41.00)	$H=0.502$	0.778

表 3 各组间 GMA 参数比较

参数	NTG 组	NTG 疑似组	健康对照组	H	P
GCC 平均厚度(μm)	101.98±14.07	111.00(11.00)	116.09±6.13	47.388	<0.001
GCC 上半球厚度(μm)	106.00(19.00)	112.00(11.00)	115.88±6.71	39.265	<0.001
GCC 下半球厚度(μm)	101.72±15.00	111.00(10.00)	116.00(9.00)	46.522	<0.001
GLV(%)	1.49(14.10)	0.61(2.72)	0.13(1.06)	12.171	0.002
FLV(%)	1.73(15.69)	0.81(4.47)	0.23(1.46)	12.402	0.002

2.3 三组视盘 RNFL 血流密度、黄斑区血流密度比较 比较三组间视盘周围 RNFL 血管密度, 发现 TU、IN、NL 区域组间差异无统计学意义 ($P>0.05$), 而 NU 区域 NTG 组低于疑似组, 其余各区域 NTG 组血流密度均低于疑似组和健康对照组 ($P<0.05$), 平均、上半球、及 IT 区域血流密度显著降低 ($P<0.001$)。见表 4。进一步比较黄斑区血流特征: 在 FAZ 周围 300 μm 范围内, NTG 组表层血

管密度低于疑似组和健康对照组, 深层仅低于健康对照组 ($P<0.05$); NTG 组表层、视网膜无灌注区面积大于健康对照组 ($P<0.05$)。中心凹区血流密度组间差异无统计学意义 ($P>0.05$); 旁中心凹区除鼻侧外, 其余象限血流密度 NTG 组均低于健康对照组 ($P<0.05$); 中心凹周围颞侧 NTG 组低于疑似组, 其余象限 NTG 组低于疑似组和健康对照组 ($P<0.05$)。见表 5。

表 4 视盘血流密度参数各组间比较

参数	NTG 组	NTG 疑似组	健康对照组	H	P
平均	44.23(6.74)	47.30(4.27)	47.48(3.52)	22.810	<0.001
上半球	45.00(8.00)	47.50(3.00)	48.00(4.00)	21.800	<0.001
下半球	43.50(7.00)	46.50(6.00)	47.00(3.00)	14.666	<0.001
SN	47.00(6.00)	48.00(4.00)	50.00(4.00)	29.147	<0.001
ST	45.00(9.00)	47.50(6.00)	48.00(6.00)	14.949	<0.001
TU	45.00(6.00)	45.00(7.00)	45.00(5.00)	4.759	0.093
TL	45.00(10.00)	47.00(5.00)	46.94±4.25	13.208	0.001
IT	46.00(11.00)	50.00(4.00)	50.00(4.00)	17.705	<0.001
IN	45.00(7.00)	46.00(4.00)	46.00(5.00)	6.242	0.044
NL	44.00(7.00)	45.00(4.00)	45.00(5.00)	5.896	0.052
NU	46.00(8.00)	48.00(5.00)	48.00(7.00)	8.256	0.016

表 5 黄斑血流密度参数各组间比较

参数		NTG 组	NTG 疑似组	健康对照组	H	P
FAZ300(%)	表层	38.60(16.28)	41.11(16.13)	41.00(9.82)	10.123	0.006
	深层	43.04(4.07)	45.06(7.46)	45.26±4.22	9.341	0.009
	视网膜	36.57(16.24)	38.68(14.75)	40.56(8.98)	5.732	0.057
无灌注区面积(mm ²)	表层	0.45(1.53)	0.34(0.60)	0.30(0.44)	10.336	0.006
	深层	0.48(0.79)	0.44(0.67)	0.44(0.33)	2.769	0.250
	视网膜	0.52(1.24)	0.36(0.66)	0.33(0.63)	8.172	0.017
	中心凹-VD(%)	10.58±3.66	10.61±4.06	11.70(5.45)	0.417	0.812
Para-VD(%)	颞侧	14.40(6.08)	16.35(4.15)	16.10(4.90)	7.132	0.028
	上侧	14.10(5.73)	15.75(4.15)	16.10(3.40)	8.751	0.013
	鼻侧	13.92±3.92	16.10(3.83)	16.40(4.20)	3.812	0.149
	下侧	13.33±3.24	15.25(4.95)	16.00(4.05)	7.093	0.029
Peri-VD(%)	颞侧	12.83±2.91	14.55(2.75)	13.83±2.31	7.566	0.023
	上侧	13.87±2.23	15.50(2.32)	15.30(2.15)	13.272	0.001
	鼻侧	15.85(3.78)	17.00(2.43)	16.80(2.20)	10.879	0.004
	下侧	14.25(3.05)	15.20(2.22)	15.00(3.10)	9.995	0.007

2.4 NTG 组视野 MD 与视神经 OCT 参数、GMA 参数、筛板结构参数、OCTA 参数相关性分析 在 NTG 组中,视盘面积、PTT、LCT 与视野 MD 无显著关联($P>0.05$),视杯体积、视杯深度与视野 MD 呈负相关($P<0.05$),其余视神经 OCT 参数均与视野

MD 呈正相关(均 $r\geq 0.345, P<0.05$)。黄斑区 GCC 厚度与视野 MD 呈显著正相关(均 $r\geq 0.380, P<0.05$),GLV、FLV 与视野 MD 呈负相关($r\leq -0.367, P<0.05$),最优的结构参数为 GCC 平均厚度($r=0.410, P<0.01$)。见表 6。

表 6 NTG 组视野 MD 与视神经 OCT 参数、GMA 参数、筛板结构参数相关性分析

变量		r	P
视神经 OCT 参数	RNFL 厚度		
	平均	0.370	0.003
	上半球	0.345	0.005
	下半球	0.356	0.004
	视杯体积	-0.307	0.014
	视盘面积	-0.134	0.290
GMA 参数	盘沿面积	0.379	0.002
	GCC 平均厚度	0.410	<0.001
	GCC 上半球厚度	0.388	0.002
	GCC 下半球厚度	0.380	0.002
	GLV	-0.367	0.003
	FLV	-0.371	0.003
筛板结构参数	视杯深度	-0.285	0.022
	PTT	0.024	0.851
	LCT	0.088	0.489

OCTA 参数中,视盘周围 RNFL 血流密度(ST、TU、IN、NL、NU)、FAZ300-深层、中心凹及旁中心凹区鼻侧、中心凹周围区上/鼻侧血流密度、全层无灌注区面积均与视野 MD 无显著关联($P>0.05$),其余 OC-

TA 参数均与视野 MD 有较好的线性相关(均 $P<0.05$),最优的血管参数为 TL 区域的 RNFL 血流密度($r=0.464, P<0.001$)。见图 4。

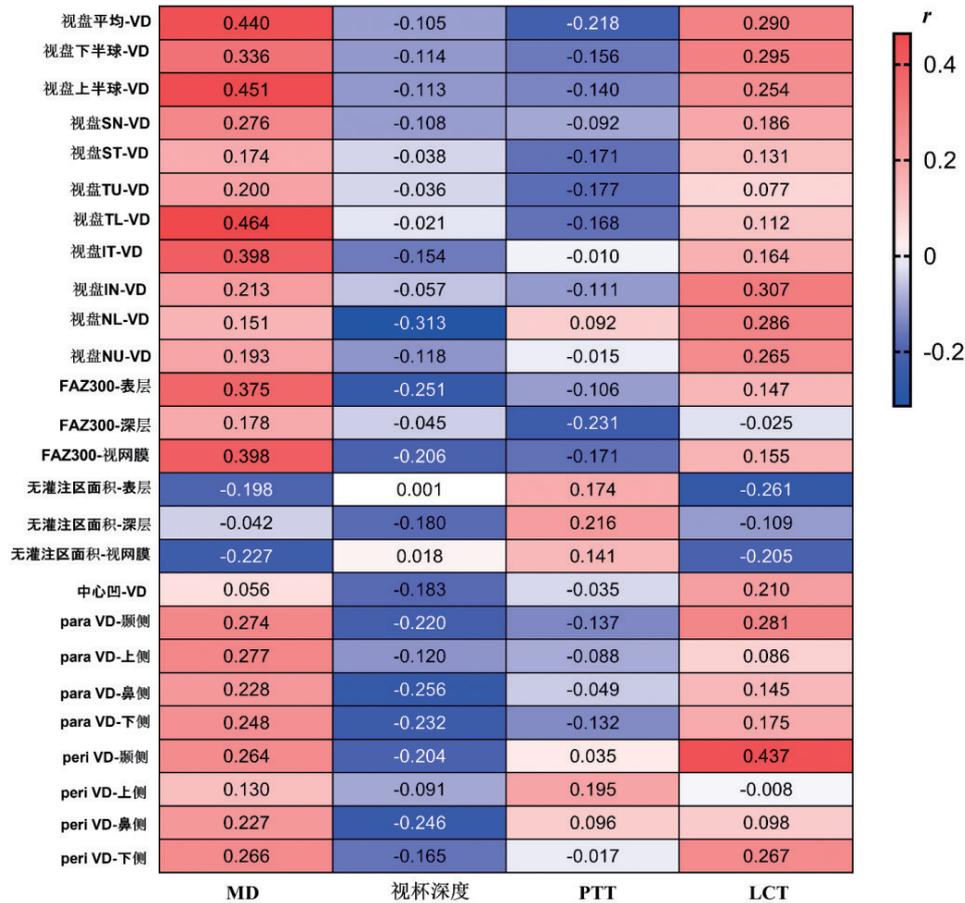


图 4 OCTA 参数与 MD、筛板结构参数相关性分析 para 代表旁中心凹区,peri 代表中心凹周围区,VD 代表血流密度。

2.5 NTG 组 GMA 参数与视盘 OCTA 参数、筛板结构参数相关性分析 线性相关分析结果显示,除 TU 区域,GCC 平均厚度均与视盘周围 RNFL 血流密度呈正相关(均 $r \geq 0.251, P<0.05$),相关性最强的区域为上半球 RNFL 血流密度($r=0.453, P<0.05$),GLV、FLV 与视盘周围 RNFL 血流密度(TU、TL、NL、SN)均无明显相关($P>0.05$),其余各区域 RNFL 血流密度均与 GLV、FLV 呈负相关,IT 区域的 RNFL 血流密度与 GLV、FLV 相关性最强($r < -0.475, P<0.001$)。PTT 与黄斑区 GCC 厚度正相关,与 GLV、FLV 负相关($P<0.05$),但视杯深度及 LCT 与 GMA 参数无线性关联($P>0.05$)。见图 5。

2.6 NTG 组筛板结构参数与 OCTA 参数相关性分析 NTG 组视杯深度仅与 NL 区 RNFL 血流密度、FAZ300-表层及旁中心凹区鼻侧血流密度呈负相关($P<0.05$),视盘平均/上半球/下半球/IN/NU/NL 区域血流密度、黄斑旁中心凹区颞侧及中心凹周

围区颞/下侧血流密度与 LCT 呈正相关,表层无灌注区面积与 LCT 呈负相关(均为 $P<0.05$),其中以中心凹周围区颞侧血流密度相关性最强($r=0.437, P<0.01$)。PTT 与所有 OCTA 参数均无显著关联($P>0.05$)。见图 4。

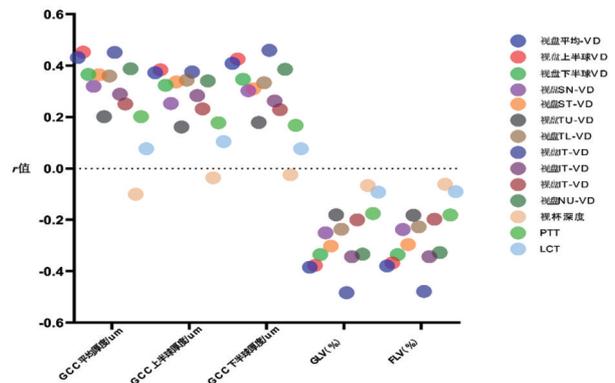


图 5 NTG 组 GMA 参数与视盘 OCTA 参数、筛板结构参数相关性分析

3 讨论

NTG 作为一种特殊类型的青光眼,其病理机制涉及机械因素与视网膜微循环障碍的交互作用。OCT 定量分析显示,NTG 患者和疑似者均存在明显的视神经结构改变,但仅有 NTG 患者的 RNFL 厚度与视野 MD 呈显著正相关,这支持青光眼进展中结构损伤早于功能损害的经典理论^[9]。GMA 结果显示,NTG 患者和 NTG 疑似者较健康对照组 GCC 厚度明显降低,但 GLV、FLV 值仅在 NTG 组明显升高,表明疑似者虽存在 RGCs 的损伤,但尚未达到引发表视野缺损的临界阈值^[10],未表现出视野缺损。此外,GMA 参数与视野 MD 相关性更强,GCC 平均厚度为最优的结构参数,这提示 GMA 比视神经 OCT 更灵敏,可以作为临床工作中早期诊断青光眼的敏感指标。

血流密度分析结果显示,NTG 患者视盘周围及黄斑区大部分区域血流密度降低,这与既往研究结果一致^[11-14],但疑似组与健康对照组血流密度无显著差异,且 NTG 组已出现特征性视野缺损,提示微循环障碍存在累积效应,血流动力学异常与视功能损伤具有时序关联性。此外,视盘 TL 区域血流密度降低与 GCC 厚度、MD 显著相关,其血流减少可能通过影响颞侧弓形神经纤维的供氧和营养^[15],导致 RGCs 轴突能量代谢障碍和轴浆流阻滞,从而早期引发视野缺损。

在黄斑区微循环分析中,NTG 患者除旁中心凹鼻侧区域外,旁中心凹区和中心凹周围区表层血管密度均降低,但仅有中心凹周围区血管密度在 NTG 组与疑似组间呈现特异性差异,提示该区域可能是青光眼性损伤的初始靶点,其微循环障碍可能随病程进展向旁中央区及中心凹区扩展^[16]。FAZ 周围 300 μm 区域的表层及视网膜血管密度降低与视野损伤的相关性显著高于其他区域,结合该区域密集分布约 50% 的 RGCs 的解剖特征^[17],证实该区域微循环障碍通过引发 RGCs 代谢紊乱,在 NTG 神经退行性病变中起关键作用。这些结果从血流动力学层面揭示了循环障碍在 NTG 进展中的核心作用,并支持"阈值效应"理论——即微循环障碍需突破特定临界值方可触发可检测的视神经损伤,这为疑似组在血流代偿状态下暂未发生功能损伤的现象提供了机制解释。

筛板由胶原纤维和弹性纤维横向交织构成多孔网络,通过容纳视神经纤维束形成骨骼框架,缓冲眼内压对视神经的机械应力^[18],其形态改变与青

光眼进展密切相关。Kim 教授团队系列研究揭示,NTG 患者普遍存在筛板结构异常,包括筛板深度加深^[19]、PTT 及 LCT 变薄^[20,21],以及 LCCI 改变^[4]等。本研究发现 NTG 患者视杯深度显著增加,PTT 明显变薄,但 LCT 与疑似组及健康对照组差异不显著,这可能与本研究纳入患者大部分为早期有关。进一步分析显示,NTG 患者视盘和黄斑部分区域血流密度与 LCT 呈特异性关联,而 PTT 与黄斑区 GCC 厚度、GLV 及 FLV 呈线性相关,提示筛板生物力学特性存在区域异质性。PTT 变薄可能削弱筛板对眼内压的缓冲能力,增加机械应力并干扰轴突轴浆运输^[22],导致 RGCs 代谢障碍;而 LCT 与视盘周围及黄斑颞侧血流密度的关联性,则提示筛板变形可能通过影响局部微循环灌注诱发 RGCs 损伤,这为"血管-机械耦合假说"^[23]提供了重要证据——即微循环障碍与筛板结构脆弱性共同驱动 RGCs 退行性变。然而,本研究受限于横断面研究设计,无法明确筛板形态学改变与微循环障碍之间的因果关系,因此对潜在病理机制的阐释存在一定局限性。值得注意的是,疑似青光眼组虽未表现出显著筛板参数差异,但已存在明确的结构损伤征象,提示除筛板形变外,可能存在其他始动因素参与疾病早期病理过程。近期研究显示,巩膜特性改变显著影响筛板生物力学^[24],筛板-巩膜交界处应变最大,鼻侧象限应变最低^[25],这可能解释本研究中 LCT 仅与黄斑颞侧血流密度相关。基于上述发现,后续研究建议构建动物模型深入探究巩膜力学特性对筛板生物力学及微循环的影响机制,为 NTG 的多靶点干预提供理论依据。

本研究存在以下局限性:首先,样本量较小可能受限于个体变异对结果的潜在影响,未来需通过扩大样本量验证结论的普适性;其次,横断面设计难以明确视网膜微循环障碍、筛板生物力学改变与视神经结构损伤之间的时序因果关系,亟待纵向研究揭示其动态关联;再次,本研究在相关性分析部分未采用多重比较校正方法,可能导致 I 类错误风险升高影响检验结果;最后,筛板参数虽由同一名技术员测量,但难免出现测量误差,未来需借助自动化测量技术提升参数精度。

综上,筛板生物力学通过微循环障碍与机械应力双重作用,触发 RGCs 损伤级联效应,验证了血管-机械耦合机制在 NTG 发病中的核心地位。视网膜微循环障碍与视神经结构损伤形成恶性循环,共同推动青光眼性视野缺损的进展。多模态影像技

术成功构建"结构-血流-功能"三位一体的评估体系,为解析筛板形变与青光眼损伤的时空关联提供了系统化研究工具,为 NTG 的早期诊断、全程化病情监测,以及制定个体化治疗策略提供关键技术支撑。

【参考文献】

- [1] Gedde SJ, Vinod K, Wright MM, et al. Primary open-angle glaucoma preferred practice pattern [J]. *Ophthalmology*, 2021, 128(1): 71-150.
- [2] Zhao J, Solano MM, Oldenburg CE, et al. Prevalence of normal-tension glaucoma in the Chinese population: a systematic review and meta-analysis[J]. *Am J Ophthalmol*, 2019, 199: 101-110.
- [3] Miguel A, Silva A, Barbosa-Breda J, et al. OCT-angiography detects longitudinal microvascular changes in glaucoma: a systematic review[J]. *Br J Ophthalmol*, 2022, 106(5): 667-675.
- [4] Kang YS, Haowei Z, Sung MS, et al. Lamina cribrosa morphology in normal tension glaucoma according to the location of visual field defects[J]. *J Glaucoma*, 2023, 32(6): 466-473.
- [5] Moghimi S, Zangwill LM, Manalastas PIC, et al. Association between lamina cribrosa defects and progressive retinal Nerve fiber layer loss in glaucoma[J]. *JAMA Ophthalmol*, 2019, 137(4): 425-433.
- [6] Suh MH, Zangwill LM, Manalastas PI, et al. Optical coherence tomography angiography vessel density in glaucomatous eyes with focal lamina cribrosa defects [J]. *Ophthalmology*, 2016, 123(11): 2309-2317.
- [7] 中华医学会眼科学分会青光眼学组, 中国医师协会眼科医师分会青光眼学组. 中国青光眼指南(2020年)[J]. *中华眼科杂志*, 2020, 56(8): 573-586.
- [8] 杜一帆, 吴建, 王宁利. 应用 OCT 探究眼压与筛板参数的关系[J]. *国际眼科纵览*, 2021, 45(2): 145-151.
- [9] Hou H, Moghimi S, Zangwill LM, et al. Macula vessel density and thickness in early primary open-angle glaucoma[J]. *Am J Ophthalmol*, 2019, 199: 120-132.
- [10] Kerrigan-Baumrind LA, Quigley HA, Pease ME, et al. Number of ganglion cells in glaucoma eyes compared with threshold visual field tests in the same persons[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2000, 41(3): 741-748.
- [11] Chan PP, Shen R, Cheung CY, et al. Longitudinal change of peripapillary vessel density and retinal nerve fibre layer thickness in normal tension and primary angle closure glaucoma[J]. *Br J Ophthalmol*, 2024, 108(2): 195-202.
- [12] Shen R, Wang YM, Cheung CY, et al. Comparison of optical coherence tomography angiography metrics in primary angle-closure glaucoma and normal-tension glaucoma[J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 23136.
- [13] Huo YJ, Thomas R, Guo Y, et al. Topographic differences in superficial macular vessel density in eyes with early primary open-angle glaucoma and normal tension glaucoma [J]. *Ophthalmic Res*, 2023, 66(1): 465-473.
- [14] Cheng KKW, Tan BL, Brown L, et al. Macular vessel density, branching complexity and foveal avascular zone size in normal tension glaucoma[J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 1056.
- [15] Igarashi R, Ochiai S, Sakaue Y, et al. Optical coherence tomography angiography of the peripapillary capillaries in primary open-angle and normal-tension glaucoma[J]. *PLoS One*, 2017, 12(9): e0184301.
- [16] Lu P, Xiao H, Liang C, et al. Quantitative analysis of microvasculature in macular and peripapillary regions in early primary open-angle glaucoma[J]. *Curr Eye Res*, 2020, 45(5): 629-635.
- [17] Curcio CA, Allen KA. Topography of ganglion cells in human retina[J]. *J Comp Neurol*, 1990, 300(1): 5-25.
- [18] Oyama T, Abe H, Ushiki T. The connective tissue and glial framework in the optic nerve head of the normal human eye: light and scanning electron microscopic studies[J]. *Arch Histol Cytol*, 2006, 69(5): 341-356.
- [19] Kim GN, Kim JA, Kim MJ, et al. Comparison of lamina cribrosa morphology in normal tension glaucoma and autosomal-dominant optic atrophy[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2020, 61(5): 9.
- [20] Park JH, Yoo C, Jung JH, et al. The association between prelaminar tissue thickness and peripapillary choroidal thickness in untreated normal-tension glaucoma patients[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2019, 98(1): e14044.
- [21] Kim M, Bojikian KD, Slabaugh MA, et al. Lamina depth and thickness correlate with glaucoma severity[J]. *Indian J Ophthalmol*, 2016, 64(5): 358-363.
- [22] Park SC, Brumm J, Furlanetto RL, et al. Lamina cribrosa depth in different stages of glaucoma[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2015, 56(3): 2059-2064.
- [23] Causin P, Guidoboni G, Harris A, et al. A poroelastic model for the perfusion of the lamina cribrosa in the optic nerve head[J]. *Math Biosci*, 2014, 257: 33-41.
- [24] Sigal IA, Flanagan JG, Tertinegg I, et al. Finite element modeling of optic nerve head biomechanics[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2004, 45(12): 4378-4387.
- [25] Midgett DE, Jefferys JL, Quigley HA, et al. The inflation response of the human lamina cribrosa and sclera: Analysis of deformation and interaction[J]. *Acta Biomater*, 2020, 106: 225-241.

(收稿日期:2025-03-14;修回日期:2025-06-20)

(本文编辑:林 赟)

《实用医院临床杂志》对医学名词的撰写要求

本刊发表论文的医学名词以全国科学技术名词审定委员会审定公布的名词为准,尚未公布者以人民卫生出版社出版的《英汉医学词汇》为准。文章所用中外文医学名词,应使用全名;对于原词过长、在文中多次出现且已通过审定的名词简称,首次出现时应写出中文全称,然后在括号内写出缩略语。药物名称应使用最新版药典中的名称,不用商品名。

本刊编辑部