

便携式与传统非接触式眼压计测量不同眼压水平的准确性

彭显耀¹, 王佳慧¹, 胡静薇², 陈佳琪¹, 李武靓¹, 王天宇¹, 邬一楠¹, 徐晓萍¹

引用: 彭显耀, 王佳慧, 胡静薇, 等. 便携式与传统非接触式眼压计测量不同眼压水平的准确性. 国际眼科杂志, 2026, 26(8): 1435-1441.

作者单位: ¹(315040) 中国浙江省宁波市眼科医院; ²(315800) 中国浙江省宁波市, 北仑区第二人民医院眼科
作者简介: 彭显耀, 毕业于温州医科大学, 硕士研究生, 主治医师, 研究方向: 眼前节疾病。
通讯作者: 徐晓萍, 毕业于佳木斯大学, 硕士研究生, 主任医师, 研究方向: 青光眼. Xiaoya08@163.com
收稿日期: 2026-02-26 **修回日期:** 2026-06-26

摘要

目的: 评价便携式非接触式眼压计 (PNCT) 与传统非接触式眼压计 (NCT) 测量不同眼压水平的准确性。
方法: 回顾性研究。纳入 2025 年 1 月至 2026 年 1 月在宁波市眼科医院就诊的患者。所有患者均完成 PNCT、NCT 和 Goldmann 压平眼压计 (GAT) 测量。根据 GAT 测量值分为低眼压组 (GAT ≤ 16 mmHg)、中等眼压组 (16 mmHg < GAT < 23 mmHg) 和高眼压组 (GAT ≥ 23 mmHg)。比较不同仪器和不同眼压水平间测量值的差异、相关性及其一致性。
结果: 本研究共纳入患者 94 例 184 眼, 其中男 52 例, 女 42 例, 平均年龄 48.6 ± 16.4 岁, GAT、PNCT、NCT 测量眼压值分别为 [19.3 (15.5, 24.0)、19.3 (16.0, 24.1)、19.0 (15.0, 26.0) mmHg] ($\chi^2 = 3.77, P > 0.05$)。Spearman 相关分析显示, PNCT 和 NCT 与 GAT 测量的眼压值均呈正相关 ($r_s = 0.86, 0.84, P < 0.05$)。ICC 分析显示, PNCT 与 GAT 的 $ICC = 0.89 (P < 0.05)$, NCT 与 GAT 的 $ICC = 0.88 (P < 0.05)$, 三组仪器整体 $ICC = 0.88 (P < 0.05)$ 。Bland-Altman 分析显示, PNCT 与 GAT 测量的眼压平均偏倚为 0.1 mmHg (95% LoA: -7.3-7.6 mmHg); NCT 与 GAT 测量的眼压平均偏倚为 0.1 mmHg (95% LoA: -8.4-8.6 mmHg)。根据 GAT 测量的眼压值进行分组, 低眼压组 60 眼 (32.6%) 眼压 ≤ 16 mmHg, 中等眼压组 63 眼 (34.2%) 16 mmHg < 眼压 < 23 mmHg, 高眼压组 61 眼 (33.2%) 眼压 ≥ 23 mmHg。低眼压组中 PNCT 和 GAT 测量值平均偏倚为 1.5 mmHg (95% LoA: -4.4-7.4 mmHg); NCT 和 GAT 测量的眼压平均偏倚为 0.5 mmHg (95% LoA: -5.6-6.6 mmHg); 中等眼压组中 PNCT 和 GAT 测量眼压平均偏倚为 -0.2 mmHg (95% LoA: -5.4-5.1 mmHg); NCT 和 GAT 测量眼压平均偏倚为 -0.1 mmHg (95% LoA: -8.6-8.4 mmHg); 高眼压组中 PNCT 和 GAT 测量眼压平均偏倚为 -0.8 mmHg (95% LoA: -10.6-8.9 mmHg); NCT 和 GAT 测量眼压平均偏倚为 -0.1 mmHg (95% LoA: -10.5-10.4 mmHg)。本研究共有 175 眼完成了中央角膜厚度 (CCT) 测量, 平均 CCT 为

553.3 ± 35.9 (450-660) μm。GAT ($r_s = 0.31$)、PNCT ($r_s = 0.39$) 及 NCT ($r_s = 0.40$) 的测量值均与 CCT 呈正相关 ($P < 0.05$)。PNCT 与 GAT 测量值的差值与 CCT 无相关性 ($r_s = 0.08, P > 0.05$); NCT 与 GAT 测量值的差值与 CCT 呈正相关 ($r_s = 0.23, P < 0.05$)。
结论: PNCT 和 NCT 与 GAT 测量眼压结果相关性高、一致性良好, 而且 PNCT 受 CCT 影响更小。但随着眼压升高, PNCT 和 NCT 的测量误差也有所增大。PNCT 和 NCT 的测量结果只能作为参考, 均不能代替 GAT。
关键词: 眼压; Goldmann 压平眼压计; 便携式非接触式眼压计; 中央角膜厚度
DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2026.8.22

Accuracy of portable and traditional non-contact tonometers in measuring different intraocular pressure levels

Peng Xianyao¹, Wang Jiahui¹, Hu Jingwei², Chen Jiaqi¹, Li Wuliang¹, Wang Tianyu¹, Wu Yinan¹, Xu Xiaoping¹

¹Ningbo Eye Hospital, Ningbo 315040, Zhejiang Province, China;
²Department of Ophthalmology, Beilun District Second People's Hospital, Ningbo 315800, Zhejiang Province, China
Correspondence to: Xu Xiaoping. Ningbo Eye Hospital, Ningbo 315040, Zhejiang Province, China. Xiaoya08@163.com
Received: 2026-02-26 Accepted: 2026-06-26

Abstract

• **AIM:** To evaluate the accuracy of a portable non-contact tonometer (PNCT) compared with a traditional non-contact tonometer (NCT) in measuring intraocular pressure (IOP) at different levels.
• **METHODS:** Patients who presented to Ningbo Eye Hospital between January 2025 and January 2026 were retrospectively included. All patients underwent measurements using PNCT, NCT, and Goldmann applanation tonometry (GAT). Based on the GAT measurements, the patients were categorized into a low IOP group (IOP ≤ 16 mmHg), a moderate IOP group (16 mmHg < IOP < 23 mmHg), and a high IOP group (IOP ≥ 23 mmHg). The differences, correlations, and agreement of the measurements among the different instruments and across various IOP levels were compared.
• **RESULTS:** A total of 94 patients (184 eyes) were included in this study, comprising 52 males and 42

females with a mean age of 48.6 ± 16.4 y. The median IOP values measured by GAT, PNCT, and NCT were 19.3 (15.5, 24.0), 19.3 (16.0, 24.1), and 19.0 (15.0, 26.0) mmHg, respectively ($\chi^2 = 3.77$, $P > 0.05$). Spearman correlation analysis revealed that the IOP values measured by both PNCT and NCT were positively correlated with those measured by GAT ($r_s = 0.86$ and 0.84 , respectively, $P < 0.05$). Intraclass correlation coefficient (ICC) analysis demonstrated an ICC of 0.89 between PNCT and GAT ($P < 0.05$), and 0.88 between NCT and GAT ($P < 0.05$), with an overall ICC of 0.88 among the three instruments ($P < 0.05$). Bland - Altman analysis indicated a mean bias of 0.1 mmHg [95% limits of agreement (LoA): - 7.3 to 7.6 mmHg] between PNCT and GAT, and a mean bias of 0.1 mmHg (95% LoA: - 8.4 to 8.6 mmHg) between NCT and GAT. Based on the GAT measurements, the eyes were categorized into a low IOP group (60 eyes, 32.6%, $IOP \leq 16$ mmHg), a moderate IOP group (63 eyes, 34.2%, $16 \text{ mmHg} < IOP < 23$ mmHg), and a high IOP group (61 eyes, 33.2%, $IOP \geq 23$ mmHg). In the low IOP group, the mean bias compared to GAT was 1.5 mmHg (95% LoA: -4.4 to 7.4 mmHg) for PNCT and 0.5 mmHg (95% LoA: -5.6 to 6.6 mmHg) for NCT. In the moderate IOP group, the mean bias was - 0.2 mmHg (95% LoA: - 5.4 to 5.1 mmHg) for PNCT and -0.1 mmHg (95% LoA: -8.6 to 8.4 mmHg) for NCT. In the high IOP group, the mean bias was -0.8 mmHg (95% LoA: -10.6 to 8.9 mmHg) for PNCT and -0.1 mmHg (95% LoA: -10.5 to 10.4 mmHg) for NCT. Furthermore, 175 eyes underwent central corneal thickness (CCT) measurements, with a mean CCT of 553.3 ± 35.9 ($450 - 660$) μm . The IOP measurements from GAT ($r_s = 0.31$), PNCT ($r_s = 0.39$), and NCT ($r_s = 0.40$) all exhibited positive correlations with CCT ($P < 0.05$). Notably, the measurement difference between PNCT and GAT was not correlated with CCT ($r_s = 0.08$, $P > 0.05$), whereas the difference between NCT and GAT showed a positive correlation with CCT ($r_s = 0.23$, $P < 0.05$).

- CONCLUSION: The IOP measurements obtained by PNCT, NCT, and GAT demonstrated strong correlation and good agreement, with PNCT being less influenced by CCT. However, as IOP levels increased, the measurement errors of both PNCT and NCT also increased. Therefore, PNCT and NCT readings should only serve as references and cannot replace GAT.
- KEYWORDS: intraocular pressure; Goldmann applanation tonometry; portable non-contact tonometer; central corneal thickness

Citation: Peng XY, Wang JH, Hu JW, et al. Accuracy of portable and traditional non - contact tonometers in measuring different intraocular pressure levels. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2026, 26(8):1435-1441.

0 引言

眼压(intraocular pressure, IOP)是眼科临床诊断和管理中的重要指标,尤其在青光眼的筛查、诊断和随访中具有关键作用。眼压测量的高低会影响眼科疾病的诊疗决策继而影响疾病转归,因此准确地测量眼压至关重要。

1865年,Von Graefe开发了首台眼压测量仪,开创了人类眼压测量的先河^[1]。随后问世的 Goldmann 压平眼压计(Goldmann applanation tonometry, GAT),被公认为是眼压测量的“金标准”^[2]。然而,GAT也存在一些局限性,例如需要表面麻醉、荧光素染色等,并且受角膜条件和操作者技能影响。

随着眼压测量技术的不断迭代,传统非接触式眼压计(non-contact tonometry, NCT)因其无需麻醉、操作简便、患者舒适度高等优点,在社区筛查及临床诊疗中得到广泛的应用。近期上市的便携式非接触式眼压计(portable non-contact tonometer, PNCT),更是在传统非接触式眼压计的优点上,实现了便携以及一键自动测量的功能。本研究旨在通过回顾性对比分析,系统评估 PNCT、NCT 与 GAT 在不同眼压水平下的测量准确性。

1 对象和方法

1.1 对象 本研究为回顾性研究。纳入 2025 年 1 月至 2026 年 1 月在宁波市眼科医院就诊的患者。纳入标准:(1)在门诊就诊时,单眼或双眼连续完成了 PNCT、NCT 和 GAT 三种眼压计的测量;(2)至少 1 眼完成 Pentacam 眼表综合分析仪检查,并成功测量出中央角膜厚度。排除标准:(1)角膜高度散光者(散光度数>3.00 D);(2)圆锥角膜;(3)既往有角膜瘢痕或者做过角膜手术者;(4)配戴隐形眼镜者。本研究遵循《赫尔辛基宣言》的原则,经宁波市眼科医院伦理委员会批准。由于本研究为回顾性、非干预性,因此获得知情豁免。

1.2 方法 所有的患者均按照 PNCT、NCT、GAT 的顺序进行眼压的测量。考虑到眼压的波动性,纳入的患者均为门诊就诊时连续完成三种眼压计的测量。在保证测量操作规范的情况下,在尽量短的时间内进行眼压测量。

PNCT 测量由患者本人根据设备的语音提示进行操作。测量时,患者通过点击确认键开始测试,将眼睛放置在眼托上,待位置调整好后进行检测,每只眼睛获取 3 次有效数据,取平均值。如果患者遇到困难,检查员会提供指导。NCT 测量由专门的检查员完成。在确认角膜位置无误后,启动测量,每只眼睛获取 3 次有效数据,取平均值。GAT 测量是由一名指定的眼科医生进行,使用 Goldmann 眼压计。被测眼滴表面麻醉剂盐酸丙美卡因滴眼液 1 滴,荧光素纸置结膜囊内使泪液染色,用棉球吸除过多的泪液,然后进行测量。测量 2 次眼压取平均值,若两次测量差值>2 mmHg,则测量第 3 次,为避免极端异常值对整体结果的干扰,取 3 次结果的中位数作为测量结果。Pentacam 检查测量由专门的检查员完成。调整设备直至看到实时的 Scheimpflug 图像,同时在图像上可见到红点,根据箭头指示调整 Pentacam,摄像头将自动进行旋转摄像完成扫描检查。每眼重复测量 5 次,取最好 1 次结果用于分析。考虑到角膜最薄点测量不受患者微小注视偏移的影响,具有更高的测量重复性,且能较好地反映角膜形态抗力,本研究将角膜最薄点厚度作为中央角膜厚度(central corneal thickness, CCT)纳入分析。

统计学分析:使用 SPSS 21.0 和 MedCalc 22.0 软件进行统计分析。采用 Kolmogorov-Smirnov (KS) 检验分析各组数据的正态性。正态分布数据以均数±标准差表示,非正态分布数据以 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示,采用 Friedman 检验。采用 Spearman 相关分析评估相关性,当 $0.8 \leq |r_s| < 1.0$ 为

极强相关;当 $0.6 \leq |r_s| < 0.8$ 为强相关; $0.4 \leq |r_s| < 0.6$ 为中度相关; $0.2 \leq |r_s| < 0.4$ 为弱相关; $0 \leq |r_s| < 0.2$, 为极弱相关或无相关性。采用组内相关系数(*ICC*)评价三种眼压计测量值的一致性。采用 Bland-Altman 法评价 PNCT 和 NCT 与金标准 GAT 之间的一致性,计算平均偏差及 95% 一致性界限(*LoA*)。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 纳入患者的一般资料 本研究共纳入患者 94 例 184 眼,其中男 52 例,女 42 例,平均年龄 48.6 ± 16.4 岁,GAT 测量眼压为 19.3 (15.5, 24.0) mmHg,PNCT 测量眼压为 19.3 (16.0, 24.1)mmHg,NCT 测量眼压为 19.0 (15.0, 26.0)mmHg,三种眼压计测量值比较差异无统计学意义($\chi^2 = 3.77, P > 0.05$)。

2.2 三种眼压计测量值的相关性及一致性 Spearman 相关分析显示,PNCT 与 GAT 的测量眼压值正相关($r_s =$

$0.86, P < 0.05$); NCT 与 GAT 的测量眼压值正相关($r_s = 0.84, P < 0.05$),见图 1。*ICC* 分析显示,PNCT 与 GAT 的 $ICC = 0.89 (P < 0.05)$,NCT 与 GAT 的 $ICC = 0.88 (P < 0.05)$,三组仪器整体 $ICC = 0.88 (P < 0.05)$ 。Bland-Altman 分析显示,PNCT 与 GAT 测量的眼压平均偏倚为 0.1 mmHg (95%*LoA*: -7.3-7.6 mmHg);NCT 与 GAT 测量的眼压平均偏倚为 0.1 mmHg (95%*LoA*: -8.4-8.6 mmHg) (图 2)。

2.3 三种仪器测量不同眼压水平的一致性 根据 GAT 测量的眼压值进行分组,低眼压组 60 眼 (32.6%) 眼压 ≤ 16 mmHg,中等眼压组 63 眼 (34.2%) $16 < \text{眼压} < 23$ mmHg,高眼压组 61 眼 (33.2%) 眼压 ≥ 23 mmHg。符合国际标准 ISO 8612 要求的每组至少包含 40 眼。低眼压组中 PNCT 和 GAT 测量值平均偏倚为 1.5 mmHg (95%*LoA*: -4.4-7.4 mmHg);NCT 和 GAT 测量的眼压平均偏倚为 0.5 mmHg (95%*LoA*: -5.6-6.6 mmHg),见图 3。

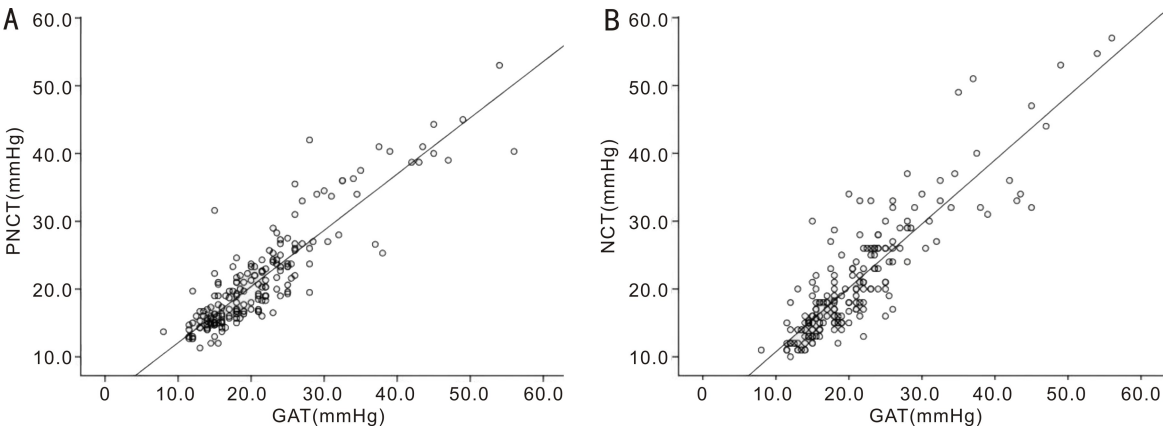


图 1 Spearman 相关分析散点图 A: PNCT 与 GAT 测量值的相关性;B: NCT 与 GAT 测量值的相关性。

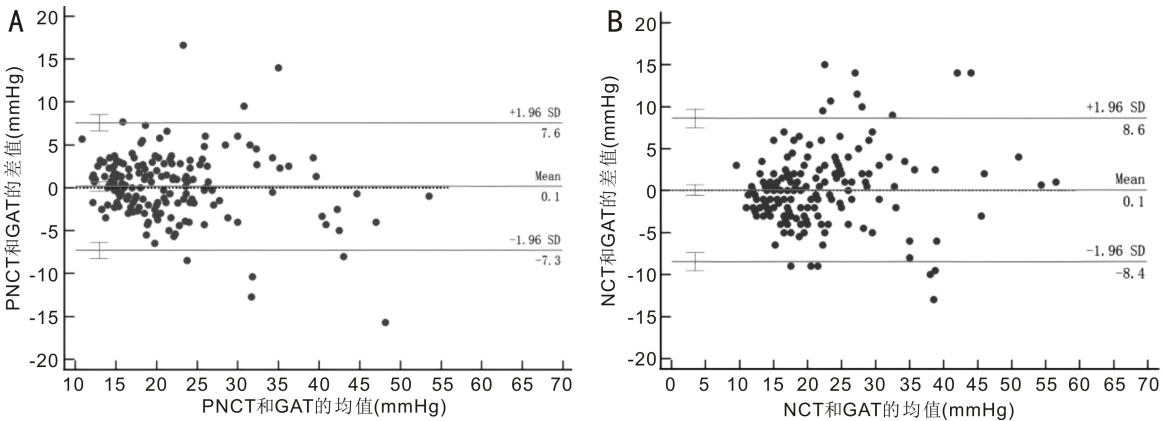


图 2 Bland-Altman 分析 A:PNCT 与 GAT 测量值的一致性;B:NCT 与 GAT 测量值的一致性。

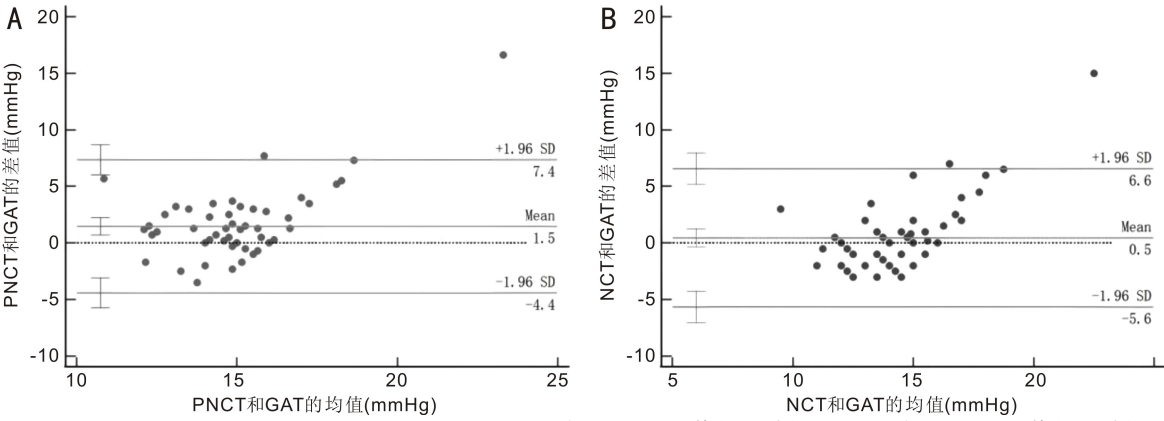


图 3 低眼压组测量值 Bland-Altman 分析 A:PNCT 与 GAT 测量值的一致性;B:NCT 与 GAT 测量值的一致性。

中等眼压组中 PNCT 和 GAT 测量眼压平均偏倚为 -0.2 mmHg ($95\%LoA: -5.4-5.1\text{ mmHg}$); NCT 和 GAT 测量眼压平均偏倚为 -0.1 mmHg ($95\%LoA: -8.6-8.4\text{ mmHg}$), 见图 4。

高血压组中 PNCT 和 GAT 测量眼压平均偏倚为 -0.8 mmHg ($95\%LoA: -10.6-8.9\text{ mmHg}$); NCT 和 GAT 测量眼压平均偏倚为 -0.1 mmHg ($95\%LoA: -10.5-10.4\text{ mmHg}$), 见图 5。

2.4 三种仪器测量不同眼压水平差值分布情况 三种仪器测量不同眼压水平差值分布情况见表 1。

2.5 三种仪器眼压测量值与 CCT 的相关性 本研究共有 175 眼完成了 CCT 测量, 平均 CCT 为 553.3 ± 35.9 ($450-660$) μm 。GAT ($r_s=0.31$)、PNCT ($r_s=0.39$) 及 NCT ($r_s=0.40$) 的测量值均与 CCT 呈正相关 ($P<0.05$)。PNCT 与 GAT 测量值的差值与 CCT 无相关性 ($r_s=0.08$, $P>0.05$); NCT 与 GAT 测量值的差值与 CCT 呈正相关

($r_s=0.23$, $P<0.05$), 见图 6。

3 讨论

准确地测量眼压在眼科临床诊断和管理中至关重要。由于眼压存在明显的生理波动, 且测量结果易受角膜厚度、操作者经验及测量原理等多因素影响, 因此不同眼压计之间的可替代性与一致性评价具有重要临床意义。本研究以 GAT 为参照, 比较了 PNCT 与 NCT 在真实门诊流程中连续测量的结果。本研究发现: (1) PNCT、NCT 与 GAT 测量的总体眼压水平差异无统计学意义; (2) PNCT 与 GAT、NCT 与 GAT 的测量结果均呈高度正相关, 且 ICC 提示一致性良好; (3) Bland-Altman 分析显示 PNCT、NCT 与 GAT 测量的平均偏差接近 0, 但 $95\%LoA$ 相对较宽, 且在高眼压组更为明显; (4) 三种眼压计测量值均与 CCT 呈正相关, 但 PNCT 与 GAT 测量的差值与 CCT 无显著相关, 而 NCT 与 GAT 测量的差值与 CCT 存在弱正相关。

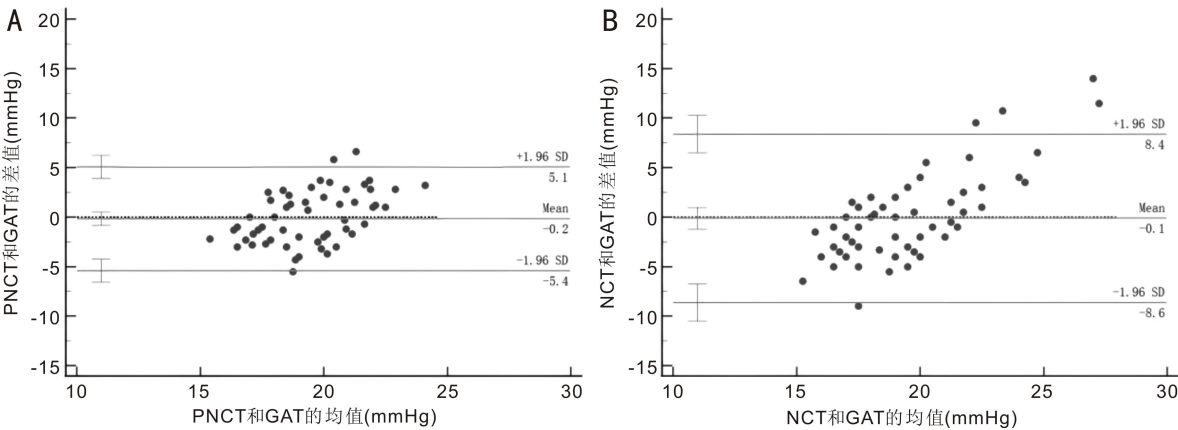


图 4 中等眼压组测量值 Bland-Altman 分析 A:PNCT 与 GAT 测量值的一致性;B:NCT 与 GAT 测量值的一致性。

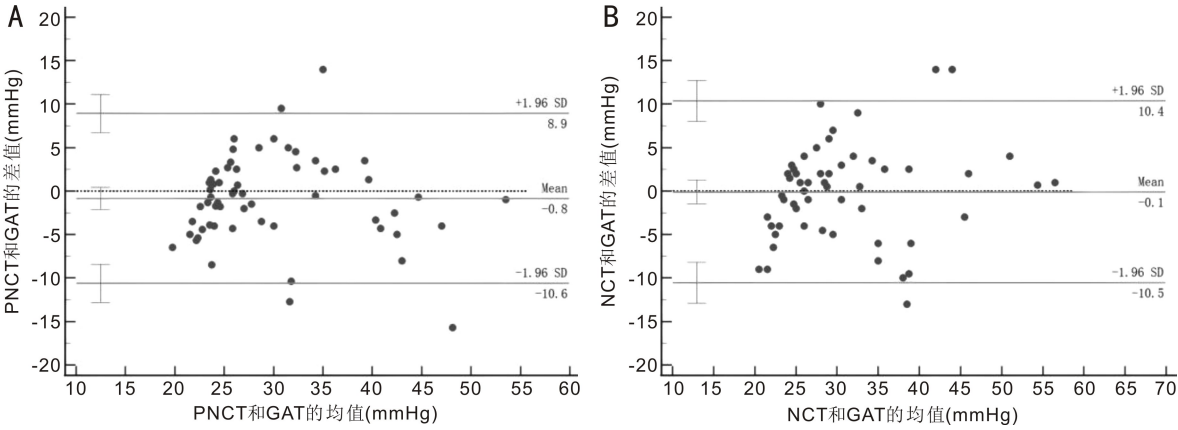


图 5 高血压组测量值 Bland-Altman 分析 A:PNCT 与 GAT 测量值的一致性;B:NCT 与 GAT 测量值的一致性。

表 1 三种仪器测量不同眼压水平差值分布情况				眼 (%)
组别	眼数	偏差范围 (mmHg)	PNCT 达标	NCT 达标
低眼压组	60	$\leq \pm 2$	38 (63.3)	43 (71.7)
		$\leq \pm 3$	47 (78.3)	52 (86.7)
		$\leq \pm 5$	54 (90)	55 (91.7)
中等眼压组	63	$\leq \pm 2$	30 (47.6)	29 (46.0)
		$\leq \pm 3$	50 (79.4)	38 (60.3)
		$\leq \pm 5$	60 (95.2)	53 (84.1)
高眼压组	61	$\leq \pm 2$	22 (36.1)	24 (39.3)
		$\leq \pm 3$	29 (47.5)	33 (54.1)
		$\leq \pm 5$	49 (80.3)	46 (75.4)

注:低眼压组为眼压 $\leq 16\text{ mmHg}$;中等眼压组为 $16\text{ mmHg}<\text{眼压}<23\text{ mmHg}$;高等眼压组为眼压 $\geq 23\text{ mmHg}$ 。

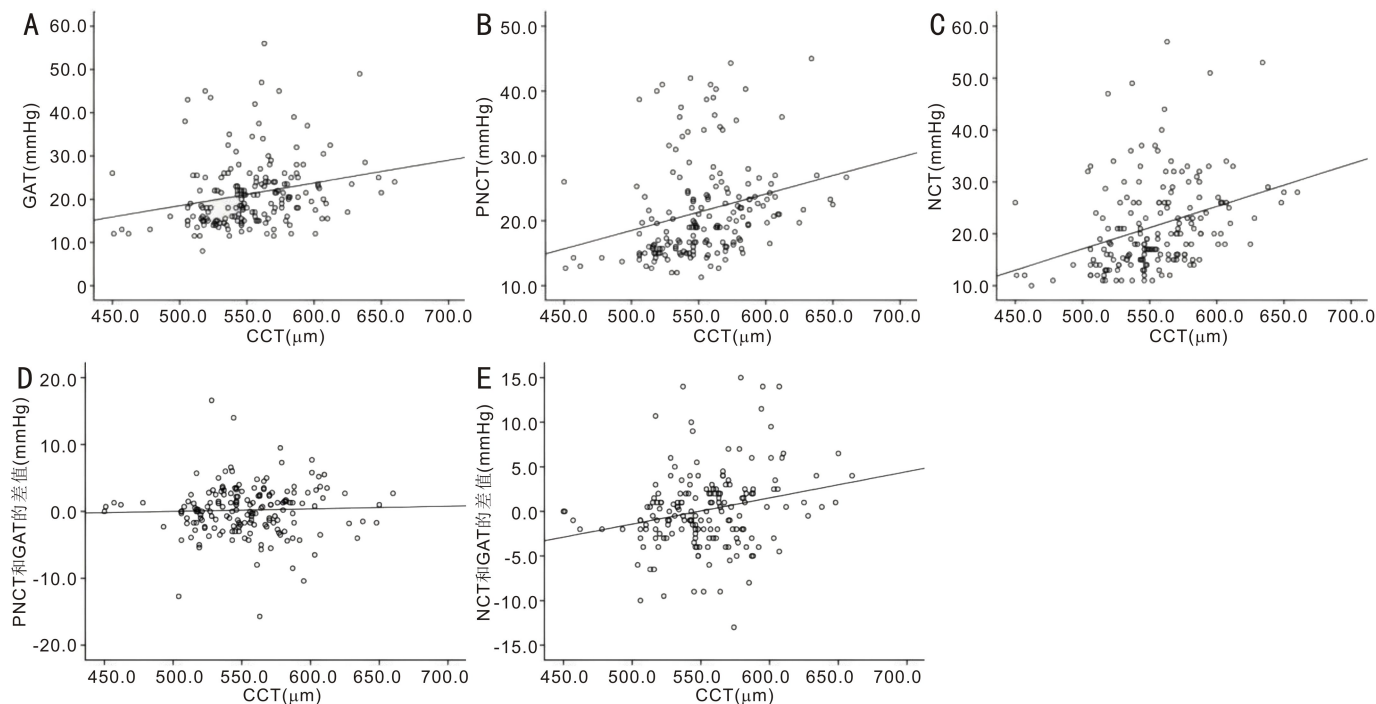


图6 Spearman 相关分析散点图 A:CCT 与 GAT 测量值的相关性;B:CCT 与 PNCT 测量值的相关性;C:CCT 与 NCT 测量值的相关性;D: PNCT 和 GAT 测量差值与 CCT 的相关性;E:NCT 和 GAT 测量差值与 CCT 的相关性。

本研究纳入患者 94 例 184 眼,GAT、PNCT、NCT 测量眼压值分别为 [19.3 (15.5,24.0)、19.3 (16.0,24.1)、19.0 (15.0,26.0) mmHg] ($\chi^2 = 3.77, P > 0.05$)。既往研究使用 GAT 和两种 NCT (Tomey NCT 和 Corvis ST) 测量被诊断为青光眼或高眼压患者 249 例的眼压,结果发现 GAT 和 Corvis ST 测量的眼压平均值相似,而两者均与 Tomey NCT 存在显著差异,Tomey NCT 测量的眼压较低^[3]。另一项研究也对比了 GAT 和两种 NCT (Reichert 7CR 和 Corvis ST) 在原发性开角型青光眼患者 90 例中的测量结果,观察到在非角膜补偿模式下,GAT 和 Corvis ST 存在显著差异,而 GAT 和 Reichert 7CR 之间没有显著差异^[4]。另一项研究中,分析了 13 种不同设备品牌的 NCT 与 GAT 的对比,其中有 7 种与 GAT 没有显著差异,而 6 种存在显著差异^[5]。这些发现表明,除了技术参数、操作者相关变异性、压力动力学和角膜厚度之外,非接触式眼压计的具体品牌和型号也可能影响测量结果。

本研究还发现,PNCT 与 GAT、NCT 与 GAT 相关系数的绝对值在 0.8–1.0 之间为极强相关。因此,PNCT 和 NCT 的测量值均与 GAT 的测量值呈高度相关。近期的相关研究也得到了类似的结论^[6]。另外,评估不同设备之间的一致性对于确定它们在眼科疾病的临床诊断和管理中的可互换性至关重要^[7]。本研究中 PNCT 和 GAT 的测量值 ICC 为 0.89,NCT 和 GAT 的测量值 ICC 为 0.88,三者整体 ICC 为 0.88,表明两种设备之间具有高度一致性。近期发表的一些关于 NCT 和 GAT 对比的研究显示,NCT 与 GAT 的相关性通常可达 0.7–0.9,与本研的结果相似^[5,8–10]。但不同设备、不同人群、以及是否纳入高血压患者会显著影响一致性指标^[11]。因此,本研究在包含较宽眼压范围 (8–56 mmHg) 的情况下仍获得较高 ICC,进一步支持 PNCT 和 NCT 在总体层面具有可靠性。

一项荟萃分析研究显示,NCT 与 GAT 平均偏倚约 -0.7 mmHg,但 95%LoA 为 -8.74–7.33 mmHg,提示总体均

值差异小,但个体层面存在较宽的差异范围^[12]。因此,在一致性评价中 LoA 的解读更关键,更能反映不同测量方法在个体层面的可互换程度^[13]。本研究发现 PNCT 与 GAT 测量的眼压平均偏倚为 0.1 mmHg (95%LoA: -7.3–7.6 mmHg),NCT 与 GAT 测量的眼压平均偏倚为 0.1 mmHg (95%LoA: -8.4–8.6 mmHg)。这与既往研究结果一致^[8,14–15],说明两种设备与 GAT 不存在明显系统性偏倚 (均值接近 0),但 95%LoA 跨度较大。对单个患者而言,PNCT 和 NCT 可能出现 $\pm 7 \pm 9$ mmHg 的差异,这在青光眼风险评估与治疗调整中具有潜在临床影响。同时,这一结果也未达到 ISO 8612 指南^[16]中对上市眼压计与 GAT 眼压计差值容忍 ± 5 mmHg 的国际标准。因此,PNCT 和 NCT 更适合用于筛查、趋势随访或初步评估,而当眼压接近治疗阈值、存在视神经进行性损害或需调整治疗方案时,仍建议使用 GAT 复核。

进一步分组分析后,我们发现在低眼压组 (GAT ≤ 16 mmHg) 中,与 GAT 相比,PNCT 和 NCT 测量的眼压平均偏倚为 1.5 和 0.5 mmHg,显示出一定的高估倾向。在中等眼压组 (16 mmHg < GAT < 23 mmHg) 和高眼压组 (GAT ≥ 23 mmHg),PNCT 和 NCT 倾向于略微低估眼压。这些结果表明,与 GAT 相比,PNCT 和 NCT 在较低眼压范围内倾向于高估眼压,而在较高眼压水平下则倾向低估眼压。Chaglasian 等^[8]研究也发现了类似现象。其他研究也证实,当眼压测量值超过 21 mmHg 时,NCT 获得的数值明显低于 GAT^[4,17]。然而,一项研究报告了相反的趋势^[18],即 NCT 在较高值时倾向于高估眼压,而在较低值时则低估眼压。另一项研究也观察到 NCT 在所有眼压范围内普遍存在高估眼压的趋势^[19]。这些不一致性可能归因于气流校准、传感器灵敏度、NCT 技术固有的局限性或不同眼压水平下角膜生物力学特性的变化^[18]。从生物力学的角度来看,观察到的眼压依赖性测量差异可以用不同压力水平下角膜硬度和变形阻力的变化来解释^[20]。在高眼压

下,角膜硬度增加可能会阻碍气流引起的变形,而这种变形对于准确的 NCT 读数至关重要,从而可能导致低估^[21]。相比之下,GAT 的直接接触方法以及操作员控制的力可能受这些硬度变化的影响较小^[1]。在临床上,低眼压情况下高估眼压可能导致不必要的治疗升级,而高眼压情况下低估眼压则可能延误及时干预。因此,了解眼压计与金标准 GAT 的偏差程度和方向对于临床应用至关重要。我们也发现在高眼压组($GAT \geq 23$ mmHg),PNCT 和 NCT 与 GAT 相比,平均偏倚的 LoA 显著扩展。PNCT 和 GAT 的 95% LoA 为-10.6-8.9 mmHg,NCT 和 GAT 测量值的 95% LoA 为-10.5-10.4 mmHg。既往研究报道,NCT 在高眼压人群中 95% LoA 可达 ± 9 mmHg^[8],与我们的结果一致。这些研究结果都强调,眼压水平越高,NCT 的读数误差越大^[17]。这可能跟较高眼压水平下角膜滞后性降低^[18]以及角膜生物力学特性的个体差异有关^[22]。尽管如此,从“可接受误差”的角度,PNCT 和 NCT 的 95% LoA 在总体上表现稳健,与 Sachdeva 等^[14]研究结果一致,达到较高水平。

另外,CCT 是影响眼压测量的重要因素,其干扰不可忽视。本研究结果显示,GAT、PNCT、NCT 测量值均与 CCT 显著正相关($r_s=0.31,0.39,0.40$),NCT 测量值受 CCT 的影响更大。这与既往研究一致^[23-25]。但也有研究得出不同结论,认为 GAT 测量值与 CCT 无相关性^[26]。值得注意的是,本研究中 PNCT 和 GAT 差值与 CCT 无相关性($r_s=0.08,P>0.05$),而 NCT 和 GAT 差值与 CCT 存在弱正相关性($r_s=0.23,P<0.05$)。我们之前的一项前瞻性研究也发现,PNCT 与 GAT 测量值差值与 CCT 无相关性($r_s=0.08,P>0.05$)^[27]。这提示 PNCT 相较传统 NCT 可能对角膜厚度的依赖程度更低。尽管两者均基于空气脉冲压平原理,但这种差异可能归因于设备的硬件设计与算法代差。PNCT 在设计上利用双红外相机实现三维自动对齐,并采用高速光学系统完整记录了气流冲击下的角膜形变过程,通过结合气路中的高灵敏度压力传感器与先进的图像处理算法来计算施加的力^[27],这种机制可能通过分析角膜的动态形变特征,对角膜厚度及硬度引起的偏倚进行了更为复杂的“隐性补偿”。相比之下,传统 NCT 的计算模式受静态解剖参数(如 CCT)的线性干扰可能更为直接^[7,11]。既往亦有研究指出,不同非接触设备对角膜厚度和角膜生物力学的敏感性存在差异^[7,26]。当然,相关性不显著并不等同于完全不受影响,未来仍需在纳入角膜生物力学指标(如角膜滞后、角膜阻力因子等动态参数)的研究中进一步验证。简而言之,这些发现揭示了 PNCT 与传统 NCT 在 CCT 敏感性上的潜在差异,为优化临床眼压测量策略提供了新线索。

本研究亦存在若干局限:(1)本研究为回顾性研究,样本量有限,且尚未涵盖儿童和存在特殊角膜状态(圆锥角膜等)人群。(2)本研究的眼压测量顺序固定,这可能引入系统误差。(3)PNCT 虽具备可自测的优点,但由患者自测带来的测量变异性也可能对研究结果产生一定程度的干扰。(4)本研究仅纳入了静态的 CCT 指标,未结合角膜动态生物力学参数,限制了对偏倚机制的更全面解读。

尽管存在上述局限,本研究仍具有重要的创新性与临床指导价值。作为较早系统性评估 PNCT 在不同眼压分

级下测量准确性的研究之一,本研究不仅证实了其总体准确性,还率先揭示了其在克服 CCT 干扰方面的潜在优势。在临床应用层面,PNCT 摆脱了传统台式设备的体积限制,在保证较高准确性的同时,极大扩展了使用场景。它不仅适用于门诊的高效分诊,更为基层社区青光眼筛查以及未来的患者居家眼压监测提供了可靠的工具支持。

综上所述,PNCT 与 NCT 均可获得与 GAT 相近的总体眼压水平,相关性高、一致性良好,且 PNCT 展现出受 CCT 影响较小的优势。但随着眼压升高,PNCT 和 NCT 的测量误差也有所增大。PNCT 和 NCT 的测量结果只能作为参考,并不能简单代替 GAT。在高眼压或需关键治疗决策时仍建议以 GAT 复核。

利益冲突声明: 本文不存在利益冲突。

作者贡献声明: 彭显耀论文选题与修改,初稿撰写,文献检索;王佳慧数据收集,数据分析;胡静薇、陈佳琪、李武靓、王天宇、郭一楠文献检索;徐晓萍选题指导,论文修改及审阅。所有作者阅读并同意最终的文本。

参考文献

[1] Stamper RL. A history of intraocular pressure and its measurement. *Optom Vis Sci*, 2011,88(1):E16-E28.
[2] da Silva F, Lira M. Intraocular pressure measurement: a review. *Surv Ophthalmol*, 2022,67(5):1319-1331.
[3] Luebke J, Bryniok L, Neuburger M, et al. Intraocular pressure measurement with Corvis ST in comparison with applanation tonometry and Tomey non-contact tonometry. *Int Ophthalmol*, 2019, 39(11):2517-2521.
[4] Nakao Y, Kiuchi Y, Okimoto S. A comparison of the corrected intraocular pressure obtained by the corvis ST and reichert 7CR tonometers in glaucoma patients. *PLoS One*, 2017,12(1):e0170206.
[5] Stock RA, Ströher C, Sampaio RR, et al. A comparative study between the goldmann applanation tonometer and the non-contact air-puff tonometer (huvitz HNT 7000) in normal eyes. *Clin Ophthalmol*, 2021,15:445-451.
[6] Oskan Yalcin S, Kaplan AT. Comparison of intraocular pressure measurements with the tono-pen, goldmann applanation tonometer, and noncontact tonometer in nonglaucomatous pseudophakic children. *Int Ophthalmol*, 2024,44(1):285.
[7] Brusini P, Salvétat ML, Zeppieri M. How to measure intraocular pressure: an updated review of various tonometers. *J Clin Med*, 2021, 10(17):3860.
[8] Chaglasian M, Hou HY, Tafreshi M, et al. Clinical assessment of automated non-contact tonometer: interchangeability with goldmann applanation tonometry and repeatability. *J Clin Med*, 2025,14(8):2726.
[9] Porwal AC, Shrishimal M, Punamia RP, et al. Assessment of intraocular pressure measurement between Goldman applanation tonometer, rebound tonometer, non-contact tonometer, and its correlation with central corneal thickness. *Indian J Ophthalmol*, 2023, 71(5):1927-1931.
[10] Duran M. Comparison of intraocular pressure measurements obtained by icare pro tonometer, non-contact tonometer and Goldmann applanation tonometer in healthy individuals. *J Fr Ophthalmol*, 2023, 46(10):1195-1203.
[11] Nuyen B, Mansouri K. Fundamentals and advances in tonometry. *Asia Pac J Ophthalmol (Phila)*, 2015,4(2):66-75.
[12] Jerrome S, Joseph S, Niranjana B, et al. Agreement and reliability of transpalpebraltonometers with goldmann applanation tonometer a systematic review and meta-analysis. *Ophthalmol Glaucoma*, 2025, 8(3):242-256.

- [13] Giavarina D. Understanding bland Altman analysis. *Biochem Med*, 2015,25(2):141–151.
- [14] Sachdeva R, Iordanous Y, Lin T. Comparison of intraocular pressure measured by iCare tonometers and Goldmann applanation tonometer. *Can J Ophthalmol*, 2023,58(5):426–432.
- [15] Karmiris E, Tsiripidis K, Gartaganis PS, et al. Comparison of intraocular pressure obtained by Goldmann applanation tonometer, Corvis ST and an airpuff tonometer in healthy adults. *Eur J Ophthalmol*, 2021;11206721211069227.
- [16] ISO 8612: 2009; Ophthalmic Instruments—Tonometers. International Organization for Standardization; Geneva, Switzerland, 2009. <https://www.iso.org/standard/44536.html>. Accessed February 10, 2026.
- [17] Farhood QK. Comparative evaluation of intraocular pressure with an air – puff tonometer versus a Goldmann applanation tonometer. *Clin Ophthalmol*, 2013,7:23–27.
- [18] Tonnu PA, Ho T, Sharma K, et al. A comparison of four methods of tonometry: method agreement and interobserver variability. *Br J Ophthalmol*, 2005,89(7):847–850.
- [19] Li HG, Chen YH, Lin F, et al. Agreement of intraocular pressure measurement with Corvis ST, non – contact tonometer, and Goldmann applanation tonometer in children with ocular hypertension and related factors. *Int J Ophthalmol*, 2023,16(10):1601–1607.
- [20] Elsheikh A, Wang DF, Pye D. Determination of the modulus of elasticity of the human Cornea. *J Refract Surg*, 2007,23(8):808–818.
- [21] Jaycock PD, Lobo L, Ibrahim J, et al. Interferometric technique to measure biomechanical changes in the Cornea induced by refractive surgery. *J Cataract Refract Surg*, 2005,31(1):175–184.
- [22] Whitacre MM, Stein R. Sources of error with use of Goldmann – type tonometers. *Surv Ophthalmol*, 1993,38(1):1–30.
- [23] 彭悦, 赵平, 谭娟, 等. iCare IC100 眼压计测量眼压的可重复性和准确性评估. *国际眼科杂志*, 2025,25(3):494–498.
- [24] 黎长金, 李雪, 陆强. Corvis ST 与常用眼压计及角膜测厚仪在测量眼压及角膜厚度中的应用. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2022,24(4):278–285.
- [25] 郑伊苹, 赵平, 刘瑞, 等. iCare iC100 与 Corvis ST 测量眼压的重复性和一致性比较. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2021, 23(10):745–751.
- [26] Kyei S, Assiamah F, Kwarteng MA, et al. The association of central corneal thickness and intraocular pressure measures by non – contact tonometry and goldmann applanation tonometry among glaucoma patients. *Ethiop J Health Sci*, 2020,30(6):999–1004.
- [27] Peng XY, Wang JH, Chen JQ, et al. Assessment of intraocular pressure measurement between goldmann applanation tonometer and portable non – contact tonometer (TH1U). *Clin Ophthalmol*, 2026,19: 4205–4215.