

人工晶状体眼的表观调节最新进展

唐 梨^{1,2}, 汪晨净¹, 岳红云²

引用:唐梨,汪晨净,岳红云. 人工晶状体眼的表观调节最新进展. 国际眼科杂志, 2025, 25(8):1257-1260.

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目 (No. 21JR1RA180, 25JRR4422); 甘肃省卫生健康行业科研计划项目 (No. GSWSKY2024-27)

作者单位:¹ (730030) 中国甘肃省兰州市, 西北民族大学;
² (730050) 中国甘肃省兰州市, 中国人民解放军联勤保障部队第九四〇医院眼科

作者简介: 唐梨, 在读硕士研究生, 住院医师, 研究方向: 屈光白内障手术。

通讯作者: 岳红云, 眼科学、视觉心理学双博士, 主任医师, 硕士研究生导师, 研究方向: 白内障、视觉加工特征与神经机制.
yhyophthalmologist@163.com

收稿日期: 2024-12-13 修回日期: 2025-06-16

摘要

表观调节的概念源于经典晶状体调节功能缺失后的人眼调节功能, 是屈光性白内障术后视觉功能研究的重要理论框架。与传统 Von Helmholtz 调节理论聚焦晶状体形变不同, 表观调节评估晶状体外的全眼球调节水平, 其机制长期存在争议。表观调节指去除自然晶状体并植入人工晶状体后, 术眼仍表现出一定程度的屈光调节。文章系统回顾了表观调节的研究历程和检查方法的进步, 逐步推动对生理性调节理论的反思与扩展。现有研究通过整合光学参数测量与神经适应理论, 试图解析瞳孔动态变化、角膜像差等与中枢认知加工的协同效应, 该领域正逐渐从单一解剖学解释向跨学科多维模型的转型。

关键词: 表观调节; 人工晶状体植入术; 主动视觉

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2025.8.08

Advances in the apparent accommodation of intraocular lens

Tang Li^{1,2}, Wang Chenjing¹, Yue Hongyun²

Foundation items: Natural Science Foundation of Gansu Province (No.21JR1RA180, 25JRR4422); Gansu Province Health Industry Research Plan Project (No.GSWSKY2024-27)

¹ Northwest Minzu University, Lanzhou 730030, Gansu Province, China; ² Department of Ophthalmology, the 940th Hospital of Joint Logistics Support Force of People's Liberation Army, Lanzhou 730050, Gansu Province, China

Correspondence to: Yue Hongyun. Department of Ophthalmology, the 940th Hospital of Joint Logistics Support Force of People's Liberation Army, Lanzhou 730050, Gansu Province, China.
yhyophthalmologist@163.com

Received:2024-12-13 Accepted:2025-06-16

Abstract

• Apparent accommodation originates from the residual accommodation function after the absence of classic lens accommodation, serving as a critical theoretical framework in the study of visual function after refractive cataract surgery. Different from Von Helmholtz's theory, which focuses on lens deformation, it evaluates the overall accommodation capability of the eye excluding the lens, with its mechanisms remaining debated. Apparent accommodation refers to the character that pseudophakic eyes retain a certain degree of refractive accommodation after natural lens removal or intraocular lens (IOL) implantation, despite the loss of physiological accommodation. This paper systematically reviews the historical development of apparent accommodation and the advances in assessment techniques, which have gradually contributed to the re-evaluation and expansion of classical theories of physiological accommodation. Recent studies attempt to decipher the synergistic effects between pupil, corneal, and central cognitive processing by integrating optical parameter measurements with neural adaptation. This reflects a shift in the field from a singular anatomical explanation to a more interdisciplinary and multi-dimensional model.

• KEYWORDS: apparent accommodation; intraocular lens implantation; active vision

Citation: Tang L, Wang CJ, Yue HY. Advances in the apparent accommodation of intraocular lens. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2025, 25(8):1257-1260.

0 引言

表观调节的概念早在 1 个世纪前就已经出现, 并在之后的研究中得到了进一步证实。传统的单焦点人工晶状体在一定程度上能够模拟有限的自然晶状体的调节能力, 现有的多焦点人工晶状体的调节能力与自然晶状体相比也有较大差距, 由此, 对表观调节现象的深入研究不仅启动了人工晶状体眼深度知觉特征的研究, 对于双人工晶状体眼视觉协同特征的探索也具有重要意义。

1 表观调节的概念及其发展特征

人工晶状体眼的表观调节主要表现为去除自然晶状体或植入人工晶状体后, 尽管晶状体的生理调节功能丧失, 但术眼仍表现出一定程度的屈光调节。这种现象主要归因于瞳孔大小、前房深度、角膜波前像差、景深等因素, 而非生理性晶状体的形态改变, 所以这种调节力又称为人工晶状体眼的伪调节力。

1918 年, Zentmayer^[1]首次报道了无晶状体眼在仅配戴远用矫正镜片时仍具有一定的近视力功能, 这与当时的 Von Helmholtz 调节理论相悖。在 20 世纪中叶, Bettman^[2]对表观调节进行了进一步的研究。他提出, 所观察到的调节现象可能是由角膜球面像差、瞳孔的针孔效应以及无晶

状体眼的放大作用等因素综合影响所致。这为无晶状体眼表观调节的多因素性质提供了初步启示。

1979 年, Sugitani 等^[3]首次在人工晶状体眼中发现了伪调节力, 并对其进行量化测定, 测定结果显示人工晶状体眼存在约+1.9 D 的伪调节力。这个发现表明即使在人工晶状体植入后, 眼屈光状态仍然表现出一定程度的调节能力, 从而极大地延伸了表观调节的概念和应用场景。1983 年, Nakazawa 等^[4]通过比较人工晶状体植入前后的视觉性能, 证实了 Sugitani 的发现, 测得人工晶状体眼存在 2.03 ± 1.03 D 的伪调节力, 并指出瞳孔直径大小和前房深度与调节能力负相关。1988 年, Lee 等^[5]通过对单眼人工晶状体眼进行系列测试, 证明了单眼条件下表观调节和晶状体位置没有差异, 以及人工晶状体和配戴角膜接触镜的无晶状体眼的调节力没有统计学差异, 即人工晶状体眼和无晶状体眼在进行远视力矫正时均表现出一定的调节现象。这一发现为后续研究提供了新的视角, 例如在选择合适的单焦点人工晶状体时考虑表观调节的可能性对患者的屈光调节预后具有潜在价值。

国内研究始自 1992 年, 吕继光等^[6]对无晶状体眼和人工晶状体眼的调节力进行了测定, 证实了散瞳前后的表观调节力, 并观察术眼的瞳孔大小和前房深度, 认为表观调节是瞳孔大小、前房深度、玻璃体情况各种调节作用的总和, 且人工晶状体眼的表观调节幅度 (2.84 ± 2.55 D) 大于无晶状体眼 (1.81 ± 0.97 D)。1995 年, 王海林等^[7]在研究中着重关注了人工晶状体位置及类型与表观调节的关系, 认为 IOL 位于囊袋内的眼, 其表观调节幅度大于 IOL 位于睫状沟的眼, 其认为后者晶状体相对固定, 不能前后移动, 前房深度变化小。随后的研究中, 他们也测定了单焦硬性人工晶状体眼的表观调节, 并分析了可能影响表观调节的因素: 角膜散光可以增加人工晶状体眼的焦深、瞳孔的大小与进入瞳孔光线的焦深有关、晶状体移动度与表观调节力呈正相关, 形成了一个对表观调节较为系统的框架。1996 年, 杨亚波等^[8]采用了 Slataper 视标法、动态摄影法、P-VEP 法三种方法测定单焦后房型人工晶状体眼的调节力并进行比较, 其认为 P-VEP 方法和 Slataper 方法在测定结果上有非常显著的相关性, 针对儿童及老年患者采用 P-VEP 法较为客观。研究还对涉及人工晶状体眼的几个自变量与 Slataper 视标法测得的调节力进行多因素逐步回归分析, 获得各自变量与近点调节力的大小相关顺序为: 视远矫正的近视力、矫正远视力、瞳孔直径、年龄、屈光不正的度数。且视远矫正的近视力和矫正远视力与调节力呈正相关。此后, 许多不同于多焦点晶状体原理的 IOL 问世, 其中不乏基于表观调节概念, 利用睫状肌功能进行设计的晶状体, 研究多趋向于这类独特设计晶状体的伪调节力测定。

2 人工晶状体眼表观调节力特征

在社会行为差异较大的不同年龄人群, 对于视觉调节能力要求不同的前提下, 进行不同年龄人群人工晶状体眼表观调节与特征的研究, 具有重要意义。研究表明, 在最佳矫正视力的情况下, 年轻人阅读单词的能力强于老年人, 这与不同年龄段的睫状肌功能相匹配^[9-10]。但限定两者均为 20/40 视力条件下, 老年人在自然瞳孔状态下的阅读单词的能力明显优于年轻人。证实了年龄特征在表观调节中的重要意义。

2.1 主动视觉的年龄特征 主动视觉 (active vision) 主要表现为视觉的自上而下加工过程, 当概念驱动条件下完成

阅读时, 面临阅读困难, 以中文为语言的老年人采取审慎的阅读策略: 频繁重新拼读和谨慎地眼球前向运动; 以字母为语言的老年人采取更冒险的阅读策略: 跳字、根据上下文语境进行猜测。总之, 老年人会根据阅读经验和眼球运动对阅读质量进行补偿^[11]。尽管他们在全局阅读流畅度方面存在一些缺陷, 但在阅读过程中他们能有效地结合自上而下加工和自下而上加工, 以应对年龄相关的认知和感知处理下降^[12], 甚至特定情况下表现出比年轻人更佳的阅读能力。而完全依赖于单词或单字识别后进行概念综合的阅读过程则表现为阅读能力与视觉能力匹配较差。瞳孔缩小增加焦深^[13]、模糊视觉经验介导的神经补偿^[14]或两种组合的像差解释了老年人阅读模糊文本的表现强于年轻人。这也解释了主观检查方法所测得的调节力大于 ($约 1.03 \pm 0.81$ D) 客观检查方法测量的调节力的原因^[9], 即真正的表观调节^[15-16]。

2.2 被动视觉及去概念驱动的表观调节意义 被动视觉在阅读中主要表现为单字的识别之后, 形成词组与语义, 进而完成文字理解。相对主动视觉而言, 主要是自下而上加工的视觉过程。经典的人眼调节过程是由视觉中枢识别物体形态和轮廓, 经由睫状神经节后纤维完成睫状肌不同部分紧张程度, 通过悬韧带达成晶状体厚度变化完成调节过程。人工晶状体眼在被动视觉过程中, 完成表观调节可能与对侧眼视觉过程形成的双眼共轭调节相关, 也可能是在视觉反应过程中, 通过对周围物像的识别, 物体之间相对位置关系以及视觉经验 (如视觉靶点范围、大小、轮廓清晰度), 从而完成视觉调节。在同时视检查和深度知觉构成的不同融合范围测量中, 年龄呈现明确的优势, 在去概念驱动的自下而上视觉加工过程中, 年轻人的人工晶状体眼表观调节能力显著高于老年人^[17]。

3 人工晶状体眼表观调节力的测量方法

随着临床光学物理学技术的不断提高, 人工晶状体眼的表观调节力测量准确度水平不断改善, 不仅从调节幅度的量化程度逐渐精细化, 其解剖特征及调节部位定位特征也得到进一步分化。人工晶状体眼的表观调节测量方法包括主观和客观检查。经典表观调节概念 (pseudophakic accommodation) 其实是由人眼和人工晶状体眼的表观调节两部分构成。

3.1 主观检查方法 视觉过程是一个自上而下加工和自下而上加工兼有的过程, 主观检查方法所测得调节力不仅包含睫状肌的调节力、表观调节力, 还很可能包含视觉经验等机制引起的调节力。

3.1.1 移近法 移近法是指患者在远矫基础上, 嘱患者注视最佳矫正近视力下的视标上一行为标准, 将视力表以约 5 cm/s 的速度由远及近向其眼靠近, 直至视标出现持续模糊为止, 记录清晰阅读视标时视力表与患者之间的最小距离, 调节幅度 (amplitude, AMP) = $100/\text{距离(cm)}$ D^[9, 18]。但此方法依赖于患者的主观评价, 且移近过程中会由于距离的减小使视标放大, 诱发近反射, 同时可能诱发一定量的近感知调节^[19], 因此结果偏大。

3.1.2 负镜法 负镜法与移近法前提类似, 但需要把视标固定于工作距离 (一般多为 40 cm), 眼前逐次增加 -0.25 D 负镜直至视标无法看清且持续模糊, AMP = |此时的负镜总度数| + $100/\text{距离(cm)}$ D。与移近法不同的是测量过程中患者看到的视标逐渐变小。故临幊上多采用移近法和负镜法相结合的改良法^[19]。

3.1.3 离焦曲线 离焦曲线是通过改变眼的屈光度, 测量

在不同焦距下的视力,从而得到一个视力与屈光度的关系曲线,故可以间接体现患者的调节能力和提供关于人工晶状体在远、中、近视距离上的视力表现。其被学界认为是能充分体现视觉功能和辅助 IOL 临床决策的重要工具^[20-21]。其具体做法是在矫正屈光不正状态的基础上,测量患者的远视力,通过在眼前加不同的镜片造成离焦可以模拟不同距离的视觉需求。先加正镜,产生雾视放松作用,使得结果更准确。一般从+2.00 D 开始,每次增加-0.50 D,逐渐加到-10.00 D。根据结果可以绘制离焦曲线,将增加的镜片屈光度作为横坐标,将视力作为纵坐标^[22]。但这种方式因镜片的放大效应、近反射,可能会低估患者的视力。近年来有学者^[23]使用全程视觉分析仪 Binoptometer 4P,通过在同一背景灯下不断变化 E 字视标来相对客观地检测患者视力,自动绘制离焦曲线。离焦曲线越高,视力表现越好,峰值一般出现在晶状体设计的焦点距离上。它是一种衡量在不同距离或不同镜片诱导离焦水平下的视力敏锐度的指标,用于评估清晰视觉的范围^[9,24-25]。与只能提供理论上的晶状体性能的调制传递函数(modulation transfer function, MTF)相比,离焦曲线是一个能较为准确反映临床真实视觉表现的测量方法,可以很好地展现人工晶状体的特性。

3.2 客观检查方法 有学者认为客观检查方法测量的表观调节力是由于术后眼残留的高阶像差或散光造成的,又或者是患者的瞳孔较小,使针孔效应扩大了焦距深度^[26]。关于客观检查方法,较新的测量方法如下。

3.2.1 前房深度测量 大部分学者认为表观调节与前房深度(anterior chamber depth, ACD)有相关性,对其精准测量有利于科学地理解表观调节力。随着超声、光学设备等影像学检查不断发展,有研究指出,在年龄相关性白内障患者中,光学相干断层扫描(optical coherence tomography, OCT)和超声生物显微镜(ultrasound biomicroscopy, UBM)在测量 ACD 方面相关性良好^[27]。常规方法测量 ACD 是角膜前表面到人工晶状体前表面的距离,新型光学仪器测量的 ACD 是从角膜后表面到人工晶状体前表面的距离^[28],故更小更精确。Rajaraman 等分别把远处或近处视标与患者的被测量眼对齐,并将倾斜角度为 45° 的镜子放置在视轴上 40 cm 处使视标能被对侧眼观察,使用 UBM 测量眼不同屈光状态时的前房深度^[29]。Sun 等^[30]、胡碑等^[31]均使用了改良的 OCT 对 ACD 等眼前节参数进行了测量,并且不断有新一代的 OCT 设备问世,但其并不能完全等同于真实的解剖图像,加之其对特定组织的成像效果可能受到限制,测得的参数有赖于后续软件的优化。

3.2.2 动态刺激像差测量 它是一种通过观察调节过程中眼部像差变化来客观动态测量调节能力的方法。这种方法能够在调节过程中同时观察调节和瞳孔运动,从而评估眼的调节能力。因此,动态刺激像差测量(dynamic stimulation aberrometry, DSA)技术属于一种特定的视觉检测方法,用于评估眼的动态调节能力。具体测量方法是通过连接 DSA 设备和 WASCA 像差仪(Carl Zeiss Meditec AG),对患者进行目标刺激并测量眼的波前相差变化来测量和分析人的调节能力。Hammer 等^[32-33]研究中,患者首先集中注意力于远处刺激测量 100 次眼球波前相差变化,然后切换到近处刺激同样测量 100 次眼球波前相差变化。随后患者被要求再次集中注意力于远处刺激继续测量 100 次眼球波前相差变化,充分释放诱导的调节,并在完成测量后立即进行分析。如果患者达到预期的调节能力,

增加 0.5 D 的近距刺激进行下一次测量。当达到最大调节能力时,重复测量 3 次以确保结果的一致性。相比于传统的调节测量方式,动态刺激像差法可以在时间分辨率较高的情况下,甚至是在动态调节和瞳孔活动过程中进行客观、动态地测量双眼调节和瞳孔运动,调节幅度可达 7 D。
3.2.3 预见人工晶状体调节测量技术 预见人工晶状体调节测量技术(for sight intraocular lens accommodation measurement technology, FIAT),是一种新型光学仪器和分析程序,通过诱发人眼的调节反应并通过影像设备进行记录、计算机进行分析,且对人工晶状体或混浊的晶状体进行过适配。Roorda 等^[34]利用 FIAT 向参与者提供远近距离目标的视觉刺激有效地诱发调节,使用 Shack-Hartmann 波前传感器和后照明瞳孔相机记录视频,分析计算每一帧画面的瞳孔波前像差、调节范围。该系统的准确性已在模型眼和配戴试戴镜片的人眼中得到验证,其绘制的调节刺激-反应曲线与预期数据吻合。

3.2.4 新型模型眼 模型眼是一个依据人眼的平均尺寸,用各种曲率半径的球面代表眼球光学系统的共轴球面光学系统模型,其中以 Gullstrand 精密模型眼最为常用^[35],它具有不同折射率的晶状体核和皮质组成的晶状体,能较好地模拟真实眼的光学行为,对于研究眼的光学特性非常有用。但它没有全面地考虑到随年龄和调节而发生的光学参数的变化,研究人员开始开发更多个性化的模型眼^[36]。Kim 等^[37]设计的新型可移动模型眼可以直观地得出不同类型的人工晶状体眼所能看到的物像照片,并对采集的照片和视频进行定量分析。其瞳孔大小、前后房深度等都能精确调节。

3.2.5 光线追迹法 史鹏飞等^[38]通过 ZEMAX 软件进行模拟,对 128×128 条光线进行追踪,光线追迹法计算函数变量,评价模型眼光学调节力的改变。该方法通过详细追踪光线的传播路径和它们在光学系统中的相互作用,实现对光学系统的精确建模和分析。这种方法也适用于复杂和非理想的屈光系统,可完全设定或消除误差、控制影响因素。光线追迹法能够生成直观的视觉效果,展示光束的传播路径和成像效果,这对于理解光学系统的性能特征有重大价值。

4 小结

对于表观调节的研究经历了从单一因素到多重因素,从主观检查方法到客观量化分析的深化过程。最开始所定义的表观调节是有多种调节力的复合作用,而近年各种证据表明,其源于眼光学系统中的动态异常(如瞳孔大小、散光、波前像差、ACD 等)。尽管高精度的客观测量方法不断丰富,但目前缺乏统一标准,且关于睫状肌的功能、动态像差是否能转化为有效视力提升等关键问题^[39],仍有待进一步阐明。

值得注意的是,主动视觉可通过概念驱动条件下自上而下的加工的视觉过程显著提升表观调节效能,提示其具有鲜明的视觉心理学特征。主观检查法虽能反映患者的感知体验,却因稳定性不足难以精准量化。随着科技进步,基于标准化刺激的客观检查方法已逐步实现对调节能力的可重复测量,但全面解析表观调节仍需主客观方法的协同:主观检查聚焦视觉质量反馈,客观检查解析光学-神经耦合机制,二者结合方能构建完整的评估体系。

在此基础上,表观调节研究的临床价值日益凸显:传统人工晶状体选择依赖“一刀切”的度数标准,忽视患者的神经适应性和个体差异。表观调节通过精准量化瞳孔

动态响应、角膜像差、神经适应能力、生活方式问卷等,可筛选适合 IOL 联合神经适应训练的群体,为其制定个性化的人工晶状体和视觉康复方案,通过光学设计与生理机制协同作用,扩展功能性视力范围,从而提升人工晶状体植入术后视觉质量。未来需进一步开发标准化评估工具,推动“光学设计-神经适应”双向优化的精准医疗模式,提升患者无镜生活质量。这一领域的发展将深度融合眼科学、认知神经科学等,为屈光性白内障手术的范式革新提供理论支撑与实践路径。

利益冲突声明:本文不存在利益冲突。

作者贡献声明:唐梨论文选题与修改,文献检索,初稿撰写;汪晨净选题指导;岳红云选题指导,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] Zentmayer W. Apparent accommodation in aphakia. *Am J Ophthalmol*, 1918, 1(8):570-571.
- [2] Bettman JW. Apparent accommodation in aphakic eyes. *Am J Ophthalmol*, 1950, 33(6):921-928.
- [3] Sugitani Y, Komori T, Kitoh T, et al. Apparent accommodation (pseudoaccommodation) on pseudophakia. *Folia Ophthalmol Japon*, 1979, 30(2):326-331.
- [4] Nakazawa M, Ohtsuki K. Apparent accommodation in pseudophakic eyes after implantation of posterior chamber intraocular lenses. *Am J Ophthalmol*, 1983, 96(4):435-438.
- [5] Lee JS, Tchah HW, Youn DH. Apparent accommodation in monocular pseudophakic eyes and contact lens wearing monocular aphakic eyes. *Korean J Ophthalmol*, 1988, 2(1):1-4.
- [6] 吕继光, 顾扬顺. 无晶体眼和人工晶体眼的调节力测定. *实用眼科杂志*, 1992, 9:15-17.
- [7] 王海林, 关家璘, 凡长春, 等. 人工晶体位置及类型与伪调节的关系. *中国实用眼科杂志*, 1995, 5:284-286.
- [8] 杨亚波, 姚克, 姜节凯, 等. 单焦后房型人工晶体眼的调节. *中华眼科杂志*, 1996, 2:19-21.
- [9] Dhallu SK, Sheppard AL, Drew T, et al. Factors influencing pseudo-accommodation - the difference between subjectively reported range of clear focus and objectively measured accommodation range. *Vision (Basel)*, 2019, 3(3):E34.
- [10] Jung GH, Kline DW. Resolution of blur in the older eye: neural compensation in addition to optics? *J Vis*, 2010, 10(5):7.
- [11] Wang J, Li L, Li S, et al. Adult age differences in eye movements during reading: the evidence from Chinese. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci*, 2018, 73(4):584-593.
- [12] Whitford V, Titone D. Eye movements and the perceptual span during first- and second-language sentence reading in bilingual older adults. *Psychol Aging*, 2016, 31(1):58-70.
- [13] Mihelčík M, Podlesek A. Cognitive workload affects ocular accommodation and pupillary response. *J Optom*, 2023, 16(2):107-115.
- [14] Zeri F, Di Vizio A, Lucia S, et al. Cortical dynamics in visual areas induced by the first use of multifocal contact lenses in presbyopes. *Cont Lens Anterior Eye*, 2024, 47(3):102137.
- [15] Langenbucher A, Huber S, Nguyen NX, et al. Measurement of accommodation after implantation of an accommodating posterior chamber intraocular lens. *J Cataract Refract Surg*, 2003, 29(4):677-685.
- [16] Walekling M, Beck R, Stachs O, et al. Subjective and objective accommodation of the Crystalens Advanced Optics (AO) in patients 6 months after bilateral implantation. *Ophthalmology J*, 2018, 3(2):29-36.
- [17] Negishi K, Masui S, Ayaki M, et al. Clinical results and factors affecting visual function in eyes implanted with an enhanced monofocal intraocular lens. *Clin Ophthalmol*, 2023, 17:3965-3973.
- [18] Vera J, Redondo B, Martínez-Tovar JM, et al. Effect of manipulating the vergence/accommodation and image size mismatches of the ±2D flipper test on the frequency and precision of accommodative facility. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2023, 43(4):660-667.
- [19] 瞿佳(主编), 杨志宽, 蒋沁(副主编), 等. *眼视光学理论和方法*. 第3版. 北京:人民卫生出版社, 2018.
- [20] Gil MA, Varón C, Cardona G, et al. Visual acuity and defocus curves with six multifocal intraocular lenses. *Int Ophthalmol*, 2020, 40(2):393-401.
- [21] Rodríguez-Vallejo M, Burguera N, Rocha-de-Lossada C, et al. Refraction and defocus curves in eyes with monofocal and multifocal intraocular lenses. *J Optom*, 2023, 16(3):236-243.
- [22] Giménez-Calvo G, Bartol-Puyal FA, Altemir I, et al. Influence of ocular biometric factors on the defocus curve in an enlarged depth-of-focus intraocular lens. *Int Ophthalmol*, 2023, 43(3):945-955.
- [23] 黄曼莎. 离焦曲线、焦深及调节幅度评估三种老视矫正型人工晶体眼视功能的前瞻性研究. 广州医科大学, 2023.
- [24] Wu TY, Wang YX, Yu JZ, et al. Comparison of dynamic defocus curve on cataract patients implanting extended depth of focus and monofocal intraocular lens. *Eye Vis (Lond)*, 2023, 10(1):5.
- [25] Palomino-Bautista C, Sánchez-Jean R, Carmona-Gonzalez D, et al. Depth of field measures in pseudophakic eyes implanted with different type of presbyopia - correcting IOLS. *Sci Rep*, 2021, 11(1):12081.
- [26] Zhu YN, Zhong YY, Fu YY. The effects of premium intraocular lenses on presbyopia treatments. *Adv Ophthalmol Pract Res*, 2022, 2(1):100042.
- [27] Yu ZY, Wang FL, Dong F, et al. Comparison of ocular morphological parameters related to lens position by anterior segment optical coherence tomography and ultrasound biomicroscopy. *Int J Clin Pract*, 2022, 2022:7599631.
- [28] Jitendra Y, Kumar DT, Kumar SS, et al. Changes in anterior segment parameters of normal subjects during accommodation using a Scheimpflug imaging system. *Med Hypothesis Discov Innov Optom*, 2020, 1(3):124-128.
- [29] Suryakumar R, Maxwell A. Biometric assessment of pseudophakic subjects during objective accommodative stimulation: a prospective observational study. *Clin Exp Optom*, 2022, 105(4):398-403.
- [30] Sun Y, Fan S, Zheng H, et al. Noninvasive imaging and measurement of accommodation using dual-channel SD-OCT. *Curr Eye Res*, 2014, 39(6):611-619.
- [31] 胡碑, 邵一磊, 袁一民, 等. 超长深度扫描 OCT 测量人工晶状体眼调节下眼轴变化的重复性评价. *中华实验眼科杂志*, 2015, 33(11):1023-1027.
- [32] Hammer M, Heggemann Y, Auffarth GU. Dynamic stimulation aberrometry: objectively measured accommodation and pupil dynamics after phakic iris-fixated intraocular lens implantation. *Ophthalmol Sci*, 2024, 4(2):100374.
- [33] Hammer M, Heggemann Y, Auffarth GU. Introducing dynamic stimulation aberrometry: binocular objective accommodation versus subjective measures. *Ophthalmol Sci*, 2023, 3(4):100309.
- [34] Roorda A, Tiruveedhula P, Naseri A, et al. FIAT: a device for objective, optical measures of accommodation in phakic and pseudophakic eyes. *Transl Vis Sci Technol*, 2023, 12(1):9.
- [35] 曾骏文. *眼视光应用光学*. 第2版. 北京:人民卫生出版社, 2017.
- [36] 阳婷, 徐晓立, 张学典, 等. 三种年龄相关性人眼模型的成像质量比较研究. *光学仪器*, 2020, 42(4):47-55.
- [37] Kim EC, Cho SY, Kang JE, et al. Comparative analysis of optical quality of monofocal, enhanced monofocal, multifocal, and extended depth of focus intraocular lenses: a mobile model eye study. *Transl Vis Sci Technol*, 2023, 12(7):5.
- [38] 史鹏飞, 尚庆丽, 张斌, 等. 光线追迹法对 Tetraflex 调节型人工晶状体的表观调节. *中华实验眼科杂志*, 2019, 37(8):644-646.
- [39] Bang SP. *Optical Imperfection and Receptor/Neural Compensation in Aging Eyes*. University of Rochester, 2024.